



Contribution à l'intégration d'une liaison avionique sans fil. L'ingénierie système appliquée à une problématique industrielle

Johanna Berrebi

► To cite this version:

Johanna Berrebi. Contribution à l'intégration d'une liaison avionique sans fil. L'ingénierie système appliquée à une problématique industrielle. Complexité [cs.CC]. Ecole Polytechnique X, 2013. Français. NNT : . pastel-00800141

HAL Id: pastel-00800141

<https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00800141>

Submitted on 13 Mar 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse de Doctorat de l'Ecole Polytechnique
Contribution à l'intégration d'une liaison avionique sans
fil.

L'ingénierie système appliquée à une problématique
industrielle

Par :
Johanna Berrebi

Directeur de thèse:
Daniel Krob

Laboratoire d'accueil :
LIX de l'Ecole Doctorale de Polytechnique

Responsable : Louis Granboulan
Entreprise d'accueil : EADS IW

Rapporteurs :
David Naccache : ENS
Yann Pollet : Conservatoire National des Arts et Métiers
Pascale Le Gall : Ecole Centrale Paris

Jury complémentaire:
Marc Aiguier
Louis Granboulan

Février 2013

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Daniel Krob mon directeur de thèse au laboratoire du LIX pour sa patience, pour m'avoir tiré vers le haut pendant ces trois dernières années pour avoir fait sortir le meilleur de moi-même, pour la confiance qu'il m'a accordé et qui m'a permis de trouver ma voie sans lui cette aventure n'aurait pas été possible.

Je souhaiterai aussi remercier Louis Granboulan, mon encadrant chez EADS, mon Socrate des temps modernes qui a su me poser les bonnes questions pour me faire avancer et accoucher de mes idées, qui a été mon phare quand le brouillard du doute m'envahissait, qui a eu la patience de me corriger, et de me rassurer dans les différentes étapes parfois effrayantes que peuvent comporter une thèse, c'est grâce à lui que j'ai eu le courage d'aller au bout.

J'aimerais remercier au sein d'EADS Axel Tillequin et l'équipe sécurité qui m'a si généreusement accueilli, Jean Botti et Yann Barbaux pour leurs mots encourageants dans les couloirs entre deux réunions, leurs bonnes humeurs communicatives et leur gout pour la musique qu'ils ont bien voulu partager avec moi lors des événements CTO. Je n'oublierai pas Eric Duceau qui prit sur son temps de vacance pour me relire, pour ses encouragements et pour ses critiques constructives.

Je remercie aussi L'équipe du TCC5 système engineering de Martine Callot à Toulouse, Bruno Pasquier, Luc Vincent, Claude Reyterou pour avoir apporté la dimension très concrète dont j'avais besoin pour ce projet de thèse et tout particulièrement Jean-Claude Roussel qui m'a donné suffisamment confiance en moi pour soumettre mon premier article à la conférence internationale de l'INCOSEE, mon séjour à Toulouse n'aurait pas été aussi productif sans eux.

Un grand merci au consortium du projet SAHARA, Jean-Francois Perelgritz EADS qui m'a épaulé dans le montage et poussé au devant de la scène pour porter ce projet au succès, Pascale Minet de l'INRIA, Fabien Ligreau de SAFRAN, Hervé Bry d'Astrium, Gwenael Raguenees d'Eurocopter, Badr Rmili et Michel Pons du CNES (nos conversations sur la science parfois relevant plus de la spiritualité m'ont permis d'ouvrir un œil nouveau sur le monde).

J'aimerais témoigner toute ma gratitude à mes bonnes fées Amelia Pao Alvo et Julie Dapsanse les secrétaires du TCC5 qui m'ont permis de m'intégrer en douceur au groupe EADS et m'ont appris ce qu'on n'apprend pas dans les livres sur l'entreprise.

Mes derniers remerciements et non des moindres vont vers ma famille et mes fideles amies.

Papa tu es, et tu as toujours été mon roc, mon radeau, ma bouée de sauvetage.

Maman sans toi je ne me serais jamais dépassée autant merci de toujours repousser mes limites plus loin et de croire en moi.

Marine, ma sœur, Benjamin, mon frère, nous formons un tout et je n'y serai pas arrivé sans votre soutien. J'espère toujours être digne de l'admiration que vous me portez.

Mami, même si mes collègues se sont moqués de moi pendant 3 ans parce que tu m'appels tout les matins que dieu fait à 10h30 je t'aime et je sais qu'a tes yeux je suis la meilleure.

Joanna Olivia et Liza même si vous ne compreniez rien à ce que je vous racontais merci pour votre écoute et votre enthousiasme

Enfin, une fois n'est pas coutume, j'aimerais demander pardon à la victime qu'a laissé derrière elle cette thèse, à toi Yohan qui m'a supporté soutenu mais aussi subi pendant 3 ans

Sans rancunes...

Sommaire

| | | |
|------------|---|----|
| 1. | Introduction | 12 |
| 1.1. | Problématiques | 12 |
| 1.2. | Objectif de la thèse : | 13 |
| 1.3. | Motivation | 14 |
| 1.3.1. | Avancée technologique : | 14 |
| 1.3.2. | Une avancée méthodologique | 14 |
| 1.4. | Contributions et résultats attendus | 14 |
| 1.4.1. | Un véritable état de l'art et une étude de l'existant..... | 14 |
| 1.4.2. | Des solutions à nos problèmes et des levées de verrous technologiques | 15 |
| 1.4.3. | Une méthode | 15 |
| 1.5. | Les processus utilisés | 15 |
| 1.5.1. | Une procédure systémique : | 16 |
| 1.5.2. | Une procédure marketing : | 17 |
| 1.5.3. | Une procedure technique : | 18 |
| 1.5.4. | Conclusion partielle..... | 19 |
| 1.5.5. | Processus complet | 20 |
| 1.6. | Glossaire et concepts clefs | 21 |
| 2. | Approche opérationnelle en phase amont (phase de montage et de préparation) d'un projet de conception d'un système innovant | 23 |
| 2.1. | Une idée, une finalité : | 24 |
| 2.1.1. | Constat de la situation : | 25 |
| 2.1.2. | Finalités désirées | 25 |
| 2.1.3. | Idées proposées et sélectionnées | 26 |
| 2.2. | Un état de l'art..... | 26 |
| 2.2.1. | Retour d'expérience | 26 |
| 2.2.1.1. | Projets aérospatiaux | 26 |
| 2.2.1.2. | Projets non aérospatiaux ayant un axe commun | 29 |
| 2.2.2. | Groupe d'étude..... | 30 |
| 2.2.2.1. | Pôle NASA..... | 30 |
| 2.2.2.2. | Pôle ESA..... | 31 |
| 2.2.2.3. | Quelques conférences dédiées à ces sujets | 31 |
| 2.2.3. | Technologies existantes..... | 32 |
| 2.2.3.1. | Technologie disponibles sur le marché (détaillé dans l'annexe 1) | 32 |
| 2.2.3.1.1. | La norme IEEE 802.15.1 | 33 |
| 2.2.3.1.2. | La norme IEEE 802.15.3 | 33 |

| | | |
|-------------|--|----|
| 2.2.3.1.3. | La norme IEEE 802.15.4 | 33 |
| 2.2.3.1.4. | La famille de norme IEEE 802.11 | 34 |
| 2.2.3.1.5. | Le standard ZigBee..... | 34 |
| 2.2.3.1.6. | Le standard BlueTooth | 34 |
| 2.2.3.1.7. | Le standard ISA100 | 34 |
| 2.2.3.1.8. | Le standard WirelessHart | 35 |
| 2.2.3.1.9. | La norme 6LowPan | 35 |
| 2.2.3.1.10. | WiFi Low Power | 35 |
| 2.2.3.1.11. | WiDom | 36 |
| 2.2.3.2. | Tri des technologies en adéquation avec les applications..... | 36 |
| 2.2.4. | Conclusion partielle sur l'état de l'art | 38 |
| 2.2.4.1. | Résumé des déductions faites par rapport au retour d'expérience..... | 38 |
| 2.2.4.2. | Résumé des informations récoltées grâce à l'étude des technologies existantes et présentation des technologies sélectionnées..... | 39 |
| 2.2.4.2.1. | Technologies standardisées | 39 |
| 2.2.4.2.2. | Technologie en cours de développement..... | 39 |
| 2.3. | Analyse de marché | 40 |
| 2.4. | L'analyse d'un besoin | 41 |
| 2.4.1. | Les besoins avion : | 42 |
| | Hiérarchie des besoins avions | 42 |
| 2.4.2. | Les besoins hélicoptère : | 43 |
| | Hiérarchie des besoins hélicoptères | 43 |
| 2.4.3. | Lanceur:..... | 44 |
| | Hiérarchie des besoins lanceurs | 44 |
| 2.4.4. | Conclusion sur les besoins : | 45 |
| | Figure 1 : architecture modulaire | 45 |
| 2.5. | La définition d'un concept système : | 45 |
| | Figure 2 : concept système : vue d'ensemble..... | 46 |
| | Figure 3: concept système, entrée du système | 47 |
| | Figure 4 : concept système, sortie du système | 47 |
| 2.6. | Etude du potentiel..... | 48 |
| 2.6.1. | Marché aéronautique et spatial et retombées à cinq ans | 48 |
| 2.6.2. | Autres marchés | 49 |
| 2.6.3. | Club utilisateurs..... | 49 |
| 2.7. | Analyse de l'environnement..... | 49 |
| 2.7.1. | Systèmes environnants définition : | 49 |
| 2.7.2. | Acteurs types | 51 |
| | Matrice croisée entre systèmes environnants et étapes de vie du système : acteurs intervenant sur le système au cours du temps | 51 |
| 2.7.2.1. | Environnement indirect..... | 52 |
| | Figure 5 : système environnementaux indirect | 52 |
| 2.7.2.1.1. | Système environnemental :..... | 53 |
| | Figure 6 : Système environnemental au sens de l'environnement de l'aéronef... 53 | |

| | | |
|------------|---|----|
| 2.7.2.1.2. | Système normatif (législation) : | 53 |
| | Figure 7 : système législatif | 53 |
| 2.7.2.1.3. | Le système sociétal ingénierie: | 54 |
| | Figure 8: système d'ingénierie | 54 |
| 2.7.2.1.4. | Système technologique : | 54 |
| | Figure 9 : système technologique | 54 |
| 2.7.2.1.5. | Clients, opérateur, utilisateur: | 55 |
| | Figure 10 : système clients | 55 |
| 2.7.2.2. | Environnement direct | 56 |
| | Figure 11 : environnement direct du système SAHARA | 56 |
| | Figure 12 : détail des sous systèmes aéronautique | 57 |
| | Figure 13 : détail des systèmes environnementaux directs influents | 57 |
| 2.7.2.3. | SAHARA : « un système dans un système » | 58 |
| | Figure 14 : SAHARA, un système dans un système soumis à un environnement direct et indirect | 58 |
| 3. | Approche opérationnelle en phase projet de conception d'un système innovant | 59 |
| | Figure 15 : démarche systémique de la conception d'un système | 59 |
| 3.1. | Définition du système | 59 |
| 3.1.1. | Des missions accomplies par un concept | 60 |
| | Figure 16 : les entrées et sorties du système SAHARA | 60 |
| 3.1.2. | Une vision opérationnelle | 61 |
| 3.1.2.1. | Architecture de l'environnement : | 61 |
| | Figure 17 : architecture environnementale choisie pour spécifier l'ensemble des exigences | 64 |
| 3.1.2.2. | Contexte opérationnel | 66 |
| 3.1.2.2.1. | Pour le système avion | 66 |
| | Figure 18 : applications avion | 66 |
| 3.1.2.2.2. | Pour le système hélicoptère: | 67 |
| | Figure 19.1 : application hélicoptère : pale | 67 |
| | Figure 19.2 : application hélicoptère : boîte de transmission | 67 |
| 3.1.2.2.3. | Pour le système lanceur : | 68 |
| | Figure 20 : Détail d'une partie de virole avec raidisseurs détournés. | 68 |
| 3.1.2.3. | Cycle de vie | 69 |
| 3.1.2.3.1. | Cycle de vie d'un avion : | 70 |
| 3.1.2.3.2. | Cycle de vie d'un hélicoptère : | 70 |
| 3.1.2.3.3. | Cycle de vie produit : | 72 |
| 3.1.3. | Une mission accomplie pour chaque acteur | 73 |
| 3.1.3.1. | Cas d'utilisation | 73 |
| | Figure 21 : cas d'utilisation hélicoptère et avion | 73 |
| | Figure 22 : cas d'utilisation lanceur | 74 |
| 3.1.3.2. | Scénario opérationnel | 74 |
| 3.2. | Montage | 77 |
| 3.2.1. | Briefing marketing : levée d'une incompréhension : | 77 |
| 3.2.2. | Cartographie générale | 78 |
| | Figure 24 : cartographie générale | 78 |
| | Figure 25 : boucle des scénarios opérationnels | 78 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| 3.2.3. | Plan d'action : feuille de route, diagramme de Gantt..... | 79 |
| | Figure 26 : GANTT du projet SAHARA | 80 |
| 3.3. | Définition des limites du système : périmètre du produit et définition du système . | 81 |
| 3.3.1. | Un système borné | 81 |
| | Figure 27 : périmètre de SAHARA..... | 81 |
| | Figure 28 : SAHARA par bloc | 82 |
| 3.3.2. | Point focal de l'innovation discussion par bloc | 83 |
| 3.3.2.1. | Les capteurs | 83 |
| 3.3.2.2. | Traitement du signal : convertisseur analogique-numérique dans le cas où le capteur n'en comporte pas..... | 84 |
| 3.3.2.3. | Analyse : | 85 |
| 3.3.2.4. | Mémoire | 85 |
| 3.3.2.5. | Émission/réception : les antennes | 86 |
| 3.3.2.6. | Protocole de communication par le canal électromagnétique sans fil. | 88 |
| | Figure 30 : les différentes couches réseau..... | 88 |
| | Figure 31 : couche modifiée dans SAHARA | 89 |
| 3.3.2.7. | Bus communication/Interface homme machine/Alarme..... | 90 |
| 3.3.2.8. | Énergie | 90 |
| 3.3.3. | Verrous technologiques réels et choix des bornes | 91 |
| 3.4. | Définition des fonctions de service du système et leurs contraintes | 93 |
| 4. | Approche fonctionnelle en phase projet de conception d'un système innovant | 97 |
| 4.1. | Définition des exigences fonctionnelles..... | 97 |
| 4.2. | Analyse et conception fonctionnelle : architecture fonctionnelle | 98 |
| | Figure 32 : découpage fonctionnel | 98 |
| 4.3. | Analyse et dérivation des exigences de haut niveau | 99 |
| 4.3.1. | Caractéristique d'une bonne spécification d'exigences | 99 |
| 4.3.2. | Exigence de haut niveau des différentes parties prenantes | 100 |
| | Figure 33 : groupe et sous groupe de parties prenantes | 100 |
| 4.4. | Spécification des exigences..... | 103 |
| 4.4.1. | Exigences projet | 104 |
| 4.4.2. | Exigences fonctionnelles et organiques | 105 |
| 4.4.2.1. | Point glossaire : | 105 |
| 4.4.2.2. | Générales..... | 106 |
| 4.4.2.3. | Architecture physique | 106 |
| 4.4.2.4. | Modes..... | 106 |
| 4.4.2.5. | Communication / protocole..... | 107 |
| 4.4.2.6. | Liaison RF..... | 107 |
| 4.4.2.7. | Mémoire | 108 |
| 4.4.2.8. | Gestion des pannes et maintenance..... | 108 |
| 4.4.2.9. | Energie | 109 |
| 4.4.2.10. | Interfaces du réseau SAHARA..... | 109 |
| 4.4.2.10.1. | Générales | 109 |
| 4.4.2.10.2. | Interface de type A : Capteurs et actionneurs..... | 109 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| 4.4.2.10.3. | Interface de type B : Réseau de bord | 109 |
| 4.4.2.10.4. | Interfaces de type C : Moyens d'essai | 110 |
| 4.4.2.11. | Dimensions terminaux, routeurs et concentrateurs..... | 110 |
| 4.4.2.12. | Matériel..... | 110 |
| 4.4.2.13. | Plateformes d'essais et environnement des démonstrateurs..... | 111 |
| 5. | Amorce d'une approche organique en phase projet de conception d'un système innovant | 112 |
| 5.1. | Verrous technologiques et critères de sélection des technologies..... | 112 |
| 5.1.1. | Verrous technologiques :..... | 112 |
| 5.1.2. | Critères problématiques..... | 113 |
| 5.2. | Technologies finalement sélectionnées | 116 |
| 5.2.1. | UWB..... | 117 |
| 5.2.2. | Ultra Low Power Bluetooth | 117 |
| 5.2.3. | WiFi Low Power | 117 |
| 5.2.4. | 802.15.4..... | 117 |
| 5.2.4.1. | Evaluation du débit demandé par un capteur dans les conditions les plus favorables : | 118 |
| 5.2.4.2. | Spécifications des fréquences et débits pour 802.15.4..... | 120 |
| 5.2.5. | Comparaison des différentes technologies | 121 |
| 5.3. | Préparation et adaptation des protocoles sélectionnés : | 122 |
| 5.3.1. | 802.15.4..... | 122 |
| 5.3.2. | 802.11 Low Power | 124 |
| 5.4. | Amélioration du débit (critère majeure identifié)..... | 125 |
| 5.4.1. | Agrégation | 125 |
| 5.4.1.1. | Agrégation à la source..... | 125 |
| 5.4.1.2. | Agrégation sur un nœud intermédiaire..... | 125 |
| Figure 34 : | Agrégation sur nœud intermédiaire | 125 |
| 5.4.2. | Compression sans pertes | 126 |
| 5.4.2.1. | Compression à la source | 126 |
| 5.4.2.2. | Compression dans le réseau | 126 |
| 5.4.3. | Multi-interfaces | 127 |
| 5.4.3.1. | Multi-interfaces mono-technologie..... | 127 |
| 5.4.3.1.1. | Multi-interfaces multi-technologies | 127 |
| 5.4.3.1.2. | Problématique des nœuds multi-interfaces..... | 127 |
| 5.4.3.1.3. | Multi-interfaces mono ou bi-technologies..... | 127 |
| Figure 35 : | Nœud radio multi-interfaces | 127 |
| 5.4.3.1.4. | Multi-interfaces mono bi-technologies..... | 129 |
| Figure 36 : | Spectre fréquentiel des technologies 802.11 Amérique du Nord | 129 |
| 5.4.4. | Techniques de modulation | 129 |
| 5.4.4.1. | Changement en ligne de technique de modulation | 129 |
| Figure 37 : | Architecture générale d'une radio logicielle | 130 |

| | | |
|------------|--|-----|
| 5.4.4.1.1. | Avantage :..... | 130 |
| 5.4.4.1.2. | Inconvénients..... | 130 |
| 5.4.4.2. | Etalement de spectre | 130 |
| 5.5. | Approche organique en phase projet..... | 131 |
| 5.5.1. | Architecture générique | 131 |
| 5.5.1.1. | Les composants..... | 131 |
| 5.5.1.1.1. | Terminal mono-interface:..... | 131 |
| | Figure 38 : Architecture modulaire proposée pour un terminal | 131 |
| 5.5.1.1.2. | Routeur / Concentrateur..... | 132 |
| | Figure 39 : Exemple d'architecture d'un module radio multi-interfaces | 132 |
| | Figure 40: Module bi-technologies | 133 |
| 5.5.1.2. | L'étoile..... | 133 |
| 5.5.1.2.1. | Etoile Wifi Low Power..... | 133 |
| 5.5.1.2.2. | Etoile Multi-interfaces 802.15.4..... | 133 |
| | Figure 41 : Etoile multi-interfaces 802.15.4 | 134 |
| | Figure 42 : Etoile en radio logicielle | 134 |
| 5.5.1.3. | L'ilot | 135 |
| 5.5.1.3.1. | Ilot mono-technologie..... | 135 |
| | Figure 43 : ilot mono-technologie..... | 135 |
| 5.5.1.3.2. | Cohabitation de deux ilots avec technologies différentes | 136 |
| | Figure 44 : Cohabitation de deux ilots avec deux technologies différentes..... | 136 |
| 5.5.1.3.3. | Ilot bi-technologies | 136 |
| 5.5.2. | Architecture du démonstrateur SAHARA..... | 137 |
| | Figure 45 : Architecture Démonstrateur..... | 137 |
| 5.5.3. | Architecture de Recherche | 138 |
| | Figure 46 : Architecture étendue (1) | 138 |
| | Figure 46 : Architecture étendue (2) | 138 |
| | Figure 47 : Nœud multi-interfaces 802.15.4 "équivalent" à un nœud mono-interface WLP | 139 |
| 5.5.4. | Discussions sur les Exigences Système des End-Users | 140 |
| 5.5.4.1. | Exemples d'exigences difficiles ou impossibles à satisfaire | 140 |
| 5.5.4.2. | Exemples d'exigences lourdes sur protocoles réseau | 141 |
| 6. | Conclusion phase post innovation : l'approche organique en projet et post-projet | 142 |
| 7. | Bibliographie:..... | 144 |
| 7.1. | Ouvrage et articles:..... | 144 |
| 7.2. | Standard..... | 146 |
| 7.3. | Guides de référence | 146 |
| 7.4. | Normes: | 146 |
| 7.5. | Projet et groupe d'étude: | 147 |
| 7.6. | Site internet : | 147 |
| 8. | Publications et conférences | 148 |
| 9. | Annexe | 149 |
| 9.1. | Annexe 1 : état de l'art de la liste exhaustive des technologies considérées..... | 149 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 9.1.1. | La norme IEEE 802.15.1 | 149 |
| 9.1.1.1. | Architecture..... | 149 |
| | Figure 1 : Architecture avec séparation possible du contrôleur et de l'hôte. | 150 |
| 9.1.1.2. | La couche L2CAP | 150 |
| 9.1.1.3. | Le Device Manager | 151 |
| 9.1.1.4. | La couche Link Manager : | 151 |
| 9.1.1.5. | La couche Baseband..... | 151 |
| 9.1.1.6. | La couche Radio: Radio Frequency (RF) | 151 |
| 9.1.1.7. | Les services de transfert offerts à l'utilisateur | 151 |
| | Figure 2: Hiérarchie des entités chargées d'assurer les différents services. | 152 |
| | Figure 3 : Succession de paquets émis par le maître et un esclave. | 152 |
| | Figure 4 : Format d'un paquet de taille maximum 2745 bits. | 152 |
| 9.1.2. | La norme IEEE 802.15.3 | 153 |
| 9.1.2.1. | Description | 153 |
| 9.1.2.2. | Architecture du réseau | 153 |
| | Figure 5 : Type de liaison dans un piconet..... | 153 |
| | Figure 6 : Architecture en piconets. | 154 |
| 9.1.2.3. | L'accès au canal de communication | 154 |
| | Figure 7 : Structure d'une Supertrame. | 154 |
| 9.1.2.4. | La communication entre nœuds | 155 |
| 9.1.2.5. | La couche physique..... | 156 |
| 9.1.3. | La norme IEEE 802.15.4..... | 157 |
| | Figure 8: Format d'une trame MAC IEEE 802.15.4..... | 157 |
| 9.1.4. | La famille de norme IEEE 802.11 | 158 |
| 9.1.4.1. | Topologie | 160 |
| | Figure 9 : Les différents composants d'un réseau 802.11..... | 160 |
| 9.1.4.2. | Services offerts..... | 161 |
| 9.1.4.3. | Les trames 802.11 | 161 |
| 9.1.5. | Le standard ZigBee | 163 |
| 9.1.5.1. | Topologies..... | 163 |
| | Figure 10 : Topologies ZigBee..... | 163 |
| 9.1.5.2. | Stack ZigBee | 164 |
| | Figure 11 : Stack ZigBee..... | 164 |
| 9.1.5.3. | Profils ZigBee | 165 |
| 9.1.6. | Le standard BlueTooth | 165 |
| | Figure 12 : La pile protocolaire BlueTooth..... | 166 |
| 9.1.6.1. | Les profils | 166 |
| 9.1.7. | BlueTooth basse énergie | 168 |
| 9.1.8. | Le standard ISA100..... | 169 |
| 9.1.8.1. | Architecture et topologie..... | 169 |
| 9.1.8.2. | Couches basses (physique et MAC) | 170 |
| 9.1.8.3. | Couches intermédiaires (réseau et transport) | 170 |
| 9.1.8.4. | Couches hautes (application) | 170 |
| 9.1.9. | Le standard WirelessHart | 171 |
| 9.1.9.1. | La couche physique : | 171 |
| 9.1.9.2. | La couche MAC :..... | 171 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| 9.1.9.3. | Les couches réseau et transport : | 171 |
| 9.1.9.4. | La couche application : | 172 |
| 9.1.9.5. | La sécurité : | 172 |
| 9.1.10. | La norme 6LowPan | 172 |
| 9.1.10.1. | Le besoin d'une alternative IP: | 172 |
| 9.1.10.2. | Architecture protocolaire | 173 |
| | Figure 13 : Intégration des réseaux 6LoWPAN avec les réseaux existants. | 173 |
| | Figure 14: Position de la couche d'adaptation 6LoWPAN. | 174 |
| 9.1.11. | WiFi Low Power | 175 |
| 9.1.11.1. | Concernant le débit : | 175 |
| 9.1.11.2. | Concernant la portée. | 176 |
| 9.1.11.3. | Concernant la consommation. | 176 |
| 9.1.11.4. | Tendance impulsée par les smartphones | 176 |
| 9.1.11.5. | Tendance impulsée par la version n | 177 |
| 9.1.11.6. | Tendance impulsée par le marché des réseaux de capteurs. | 177 |
| 9.1.12. | WiDom | 177 |
| 9.1.12.1. | Principe: | 178 |
| | Figure 16 : Principe du protocole | 178 |
| 9.2. | Annexe 2 : applications capteurs candidate | 179 |
| 9.2.1. | LI : faible débit à l'intérieur de l'avion | 179 |
| 9.2.2. | LO : faible débit en dehors de l'avion | 180 |
| 9.2.3. | HI : haut débit à l'intérieur | 182 |
| 9.2.4. | HO : haut débit en dehors de l'avion | 183 |
| 9.3. | Annexe 3 : Tableau des applications capteur sélectionnés | 184 |
| 9.3.1. | Application avion | 184 |
| 9.3.2. | Application hélicoptère | 185 |
| 9.3.3. | Application lanceur | 186 |
| 9.4. | Annexe 4 : modélisation SysML | 188 |
| 9.4.1. | Diagramme d'exigence | 188 |
| 9.4.2. | Diagramme structure : | 189 |
| 9.4.2.1. | Définition de bloc | 189 |
| 9.4.2.2. | Bloc interne | 189 |
| 9.4.3. | Diagramme de comportement : | 189 |
| 9.4.3.1. | Cas d'utilisation | 189 |
| 9.4.3.2. | Diagramme d'activité | 189 |
| 9.4.3.3. | Diagramme de séquence | 190 |
| 9.4.3.4. | Diagramme d'état machine | 190 |
| 9.5. | Annexe 5 : Exigences des parties prenantes dérivées | 191 |
| 9.6. | Annexe 6 : Tableau de traçabilité | 199 |
| 9.7. | Annexe 7: exigences par thématique | 205 |
| 9.7.1. | Exigences projet | 205 |

| | | |
|------------|---|-----|
| 9.7.2. | Exigences fonctionnelles et organiques | 206 |
| 9.7.2.1. | Générales..... | 206 |
| 9.7.2.2. | Architecture physique | 207 |
| 9.7.2.3. | Modes..... | 208 |
| 9.7.2.4. | Communication / protocole..... | 209 |
| 9.7.2.5. | Liaison RF..... | 213 |
| 9.7.2.6. | Mémoire | 214 |
| 9.7.2.7. | Gestion des pannes et maintenance..... | 215 |
| 9.7.2.8. | Energie | 216 |
| 9.7.2.9. | Interfaces du réseau SAHARA | 217 |
| 9.7.2.9.1. | Générales | 217 |
| 9.7.2.9.2. | Interface de type A : Capteurs et actionneurs..... | 217 |
| 9.7.2.9.3. | Interface de type B : Réseau de bord | 218 |
| 9.7.2.9.4. | Interfaces de type C : Moyens d'essai | 218 |
| 9.7.2.10. | Dimensions terminaux, routeurs et concentrateurs..... | 219 |
| 9.7.2.11. | Matériel..... | 219 |
| 9.7.2.12. | Plateformes d'essais et environnement des démonstrateurs | 219 |
| 9.8. | Annexe 8 : étude fréquentielle | 222 |
| 9.9. | Annexe 9 : étude sécurité | 224 |
| 9.9.1. | Localisation des points à risques pour la sécurité | 224 |
| 9.9.1.1. | Hard | 224 |
| 9.9.1.2. | Protocole | 224 |
| 9.9.2. | Ebauches de solutions pour parer à la sécurité..... | 225 |
| 9.9.2.1. | Aspect soft ware : | 225 |
| 9.9.2.1.1. | Le dénie de service : une attaque contre la disponibilité. | 225 |
| 9.9.2.1.2. | Intrusion, écoute : | 226 |
| 9.9.2.1.3. | Intrusion et diffusion de fausses informations :..... | 231 |
| 9.9.2.2. | Aspect hard ware :..... | 231 |

1. Introduction

1.1. Problématiques

Dans un avion, un hélicoptère ou un lanceur actuel, des milliers de capteurs (de 1000 à 10000 capteurs selon l'aéronef), pour la plupart non critiques (dont une panne ne mettrait pas en péril la sécurité des passagers, [ARP 4754]), sont utilisés pour la mesure de divers paramètres (températures, pressions, positions...) Les résultats sont ensuite acheminés par des fils vers les calculateurs de bord qui les traitent. Ceci implique la mise en place de centaines de kilomètres de câbles (500 km pour un avion de ligne) dont le volume est considérable. Il en résulte une grande complexité de conception et de fabrication, des problèmes de fiabilité, notamment au niveau des connexions, et une masse importante (près de trois tonnes, tous types de câbles confondus, liaison de communication et alimentation compris, sur un A380).

Par ailleurs l'instrumentation de certaines zones est impossible car leur câblage est difficilement envisageable par manque d'espace. En outre, s'il est souvent intéressant d'installer de nouveaux capteurs pour faire évoluer un aéronef ancien, l'installation des câbles nécessaires implique un démantèlement partiel, problématique et coûteux, de l'appareil.

Pour résoudre ces problèmes, une idée innovante a émergé chez les industriels de l'aéronautique : commencer à remplacer les réseaux filaires reliant les capteurs d'un aéronef et leur centre de décision par des réseaux sans fil.

Les technologies de communication sans fil sont aujourd'hui largement utilisées dans les marchés de l'électronique de grande consommation. Elles commencent également à être déployées pour des applications industrielles comme l'automobile ou le relevé à distance de compteurs domestiques. Leur diversité reflète l'étendue des applications possibles, depuis la simple télécommande jusqu'à la transmission de flux de données complexes.

Cependant, remplacer des câbles par des ondes représente un défi technologique considérable.

- Les ondes électromagnétiques ne se propagent pas bien dans une cage de Faraday telle qu'un aéronef
- Elles sont facilement brouillées par les systèmes embarqués
- Elles risquent de brouiller ces mêmes systèmes
- Les composants électroniques disponibles sur le marché constitutifs d'un réseau de communication sans fil ne résistent pas, en l'état, aux contraintes environnementales sévères, au niveau sécurité, sûreté de fonctionnement, fiabilité, tolérance aux fautes et autres contraintes d'un milieu aérospatial.

Cette thèse sélectionne, parmi les normes de réseau sans fil existantes, celles qui sont les plus proches des besoins du secteur aéronautique et spatial, les adapte aux contraintes et aux besoins, et abouti à une série de solutions techniques adaptées. Ces technologies seront prêtes à être utilisées pour industrialiser des équipements aérospatiaux en gardant à vu les problématiques de certification.

A terme, ceci rendra possible le remplacement sur chaque aéronef de centaines de capteurs non-critiques par des versions sans fil.

Quelques projets ont été menés sur le thème du sans fil en milieu aérospatial et autour des capteurs mais ceux-ci ont difficilement rencontré le succès attendu. Le manque d'aboutissement de ces projets s'explique par l'immaturité des technologies envisagées mais aussi par une identification peu précise du besoin réel et incomplète des contraintes.

La complexité dans les systèmes industriels et organisationnels est désormais un sujet où il existe des théories structurantes et des lignes d'action de plus en plus précises. L'organisation des analyses, qu'il faut mener dans un cas comme le notre, paraît naturelle, à savoir : une identification du périmètre systémique suivi d'une analyse et d'une modélisation opérationnelle fonctionnelle et organique.

C'est très exactement l'approche que nous avons suivie pour définir les phases successives de notre recherche

1.2. Objectif de la thèse :

Le but a été d'apporter une ou des solutions à plusieurs problématiques essentielles en milieu aérospatial que sont :

- L'allègement (le poids étant un des éléments limitatifs déterminant au vol d'un aéronef)
- L'instrumentation à des fins de perfectionnement (meilleure connaissance de l'aéronef et de son environnement)
- L'amélioration de la fiabilité des systèmes embarqués

En utilisant une méthodologie évolutive et adaptée à des systèmes aussi complexes que celui-ci paraît puisque composé d'un grand nombre d'entités en interaction locale et simultanée.

1.3. Motivation

1.3.1. Avancée technologique :

Cette thèse est motivée d'une part par l'avancée non négligeable dans le milieu aérospatial que pourrait être l'établissement d'un réseau sans fil à bord d'aéronefs.

Une meilleure connaissance de l'environnement et de la santé de l'aéronef (par l'installation du système dans des zones difficiles d'accès ou déjà construites et non démontables)

Le gain sur le poids. A bord d'un avion chaque kilogramme compte et même un gain de 50 kg est significatif. C'est encore plus le cas sur un hélicoptère dont le nombre de capteurs n'est pas proportionnel au poids de l'appareil donc le moindre kilogramme gagné est important. Quand aux lanceurs, le coût du kilogramme lancé est assez élevé (10 000€) et le poids est donc une dimension à prendre en considération.

Le gain en flexibilité. Les zones inaccessibles doivent être instrumentées or ce n'est pas forcément le cas puisqu'une installation de câblage et une maintenance du matériel est difficile. Avec un réseau sans fil le problème se pose beaucoup moins.

Le gain en malléabilité et en évolutivité. Tirer des câbles dans une structure finie est peu recommandé et compliqué. Pourtant mieux instrumenter un ancien appareil avec de nouveaux capteurs permet de le rendre plus performant.

Le gain sur la complexité. Le réseau filaire actuellement installé dans les aéronefs est d'une grande complexité. Son installation comme sa maintenance prennent un temps incompressible et significatif (l'intégrateur final, Airbus pour les avions doit bien relier les systèmes entre eux). Installer des modules sans fil déjà prêts à l'emploi prendrait beaucoup moins de temps et la maintenance du réseau de communication serait simplifiée.

Le gain sur la fiabilité par la possibilité d'ajouter des redondances de signal sans modifier le poids ni le pourcentage d'encombrement et par le repérage immédiat d'une défaillance sans avoir à localiser le câble responsable

1.3.2. Une avancée méthodologique

D'autre part, étant donnée la complexité de la conception de tels systèmes il a été nécessaire de construire une méthodologie autour de ce projet, basée sur l'ingénierie système et que nous avons appliquée afin d'obtenir une gamme de systèmes innovants, il est à espérer aussi, vu le nombre de sous-systèmes à considérer, qu'une méthodologie systématique sera un bon investissement pour la réutilisation et l'exploitation à plusieurs « niveaux » [Sage02]

1.4. Contributions et résultats attendus

1.4.1. Un véritable état de l'art et une étude de l'existant

Une étude aussi complète que possible a été réalisée autour de l'existant déjà établi sur le sujet. En effet, on devra pouvoir en lisant ce mémoire de thèse avoir une idée assez précise de ce qui a été fait, aussi bien d'un point de vue scientifique (recherche) que technologique (marché du sans fil), relativement à notre problématique. Non seulement les projets liés aux

capteurs et à leur communication déjà réalisés dans le monde aéronautique français et américain ont été analysés mais aussi les résultats de projets sur de la communication sans fil embarquée sur tout type d'appareil (automobile etc...) ont été intégrés. Une liste a été dressée de toutes les technologies sans fil en indiquant leur état de maturité, leurs avantages et leurs inconvénients afin de préciser les choix possibles et les raisons de ces choix.

1.4.2. Des solutions à nos problèmes et des levées de verrous technologiques

Des projets de capteurs sans fil ont été réalisés, des technologies sans fil performantes et personnalisables ont été développées et arrivent à maturité dans des secteurs variés tels que la domotique, la santé, l'automobile ou même l'aéronautique. Cependant aucun capteur sans fil n'a été véritablement installé en milieu aérospatial car de nombreux verrous technologiques n'ont pas été levés. Fort des expériences passées, et de la maturité qu'ont prise certaines technologies, des conclusions ont été tirées des projets antérieurs afin de tendre vers des solutions plus viables. Une fois identifiés, les verrous technologiques ont été isolés. Une personnalisation de notre solution a été à envisager afin de remédier tant que faire se peut à ces points bloquants avec les moyens mis à disposition.

1.4.3. Une méthode

On a appliqué une méthodologie qui nous a permis d'identifier un maximum de contraintes, besoins et exigences. En effet il est à noter que les tentatives déjà envisagées sur le sujet se sont soldées par des échecs partiels à cause d'une méconnaissance du milieu environnant et des parties prenantes. Cette méconnaissance donne lieu à des oublis d'exigences et de contraintes qui rendent impossible l'intégration du système conçu en situation, d'autant plus si un questionnement tout au long du projet sur les contraintes n'est pas effectué régulièrement à des jalons prédéterminés. Il est difficilement imaginable d'affirmer que toutes les contraintes et exigences pourront être respectées mais un grand soin a été apporté dans les réponses aux besoins exprimés (finalités du système), il a été nécessaire d'établir des règles de priorités sur les exigences pour mieux focaliser les efforts d'innovation sur les plus importantes et choisir ainsi les technologies les plus indiquées dans notre portefeuille de technologies disponibles.

1.5. Les processus utilisés

Maintenant que la problématique est posée, (comment alléger, mieux instrumenter et améliorer la fiabilité d'un aéronef en gagnant en flexibilité, malléabilité et modularité) et qu'il apparaît clairement que la solution sera un produit innovant en l'occurrence un système de communication sans fil, nous allons expliquer le processus utilisé afin de concevoir un système viable. Notons que Selon la norme ISO 9000 de 2005

Un processus est l'ensemble d'activités corrélées ou interactives qui transforme des éléments d'entrée en éléments de sortie et qu'une procédure est la manière spécifiée d'effectuer cette activité ou un processus. Autrement dit, le processus répond à la question "quoi faire ?", tandis que la procédure répond à la question "comment faire ?". Il en résulte que la caractéristique première d'un processus est sa finalité, tandis que celle d'une procédure est l'ensemble des règles qu'elle contient. Plusieurs types de procédures existent pour élaborer un système innovant.

1.5.1. Une procédure systémique :

Cette procédure met en relief l'ingénierie des systèmes complexes avec sa méthodologie divisée en trois phases. Une grande partie de ce travail est réalisé en amont. Le point focal de cette procédure est la définition des différentes missions (objectifs) du système, il fait intervenir un long questionnement sur les exigences et besoins des parties prenantes, les contraintes dues à l'environnement, il permet d'établir des priorités. Cette phase qu'on appelle la phase opérationnelle permet d'avancer à pas assuré. Il ne serait pas souhaitable de se lancer dans la réalisation d'un nouveau produit qui coutera du temps et de l'argent sans avoir soulevé toutes les problématiques possibles et les points bloquants.

| | | |
|-----------------------------|--|--|
| Approche opérationnelle | Définir la finalité du système | On résumera les intentions réelles du promoteur du système en rapport avec une stratégie globale de l'organisme |
| | Définir les concepts | Définir les concepts On mettra en évidence les concepts fondamentaux sur lesquels on justifiera la faisabilité et l'opportunité |
| | Analyser l'environnement | On listera tous les systèmes qui interagissent avec notre système cible, ensuite on relèvera toutes les parties prenantes qu'on ira interroger pour la suite du projet pour les exigences. |
| | Définir les missions du système | Liste des objectifs généraux que devra atteindre le système |
| | Définir les limites du système | Définition de ce que l'on considère faisant partie du système |
| | Définir les fonctions de service du système et leurs contraintes | Fonction de service d'exploitation Fonction de service logistique Contraintes organisationnelle Contraintes organique ou physique Spécification de l'interface d'échange |
| | Analyser et spécifier les exigences | La spécification des exigences (analyse et raffinement des fonctions de service |
| Approche fonctionnelle | Analyse fonctionnelle | Décompose les fonctions en sous fonctions unitaires |
| | Conception fonctionnelle | Combine les chaînes fonctionnelles en un réseau de sous fonctions constituant l'architecture fonctionnelle |
| Approche organique/physique | Conception organique | Décompose le système en constituant élémentaire |
| | Conception physique | Réalisation du démonstrateur |
| Validation | tests | Analyse des résultats de tests |

Ce tableau est la synthèse de différentes sources scientifiques qui traitent du processus d'ingénierie système, comme la deuxième partie de l'ouvrage de JP. Meinadier: ingénierie et intégration des systèmes et le deuxième chapitre de systems engineering d'A. Sage: détaillé dans "a three phase and twenty two phase life cycles" sans oublier les idées globales du systems engineering handbook de la NASA) [Meinadier01] [Sage01] [Blanchard] [NASA]

1.5.2. Une procédure marketing :

Le management de l'innovation permet de lancer de nouveau produit répondant à une réelle demande. Le point focal de cette procédure est basé sur un travail en amont mais les résultats de ce travail apporteront des informations sur l'aspect marchand du produit. Le tableau ci-dessous est le résultat de la dérivation libre du guide de management de l'innovation du groupe OSEO, l'entreprise publique (mission d'intérêt général à fonctionnement privé) qui finance la croissance des PME : innovation, investissement, international, création et transmission. [OSEO]

| Phase | Etape | Resultat | Outils |
|------------------------------|--|--|---|
| Idée | Idée production et sélection | Ensemble d'idée viables ou pas | Brainstorming |
| | Analyse du marché et de la concurrence | Etude de marché Recueil d'information analyse de l'existant | Benchmarking |
| Observation et Compréhension | Analyse du besoin client | Expression de besoins | Sondage |
| | Étude du potentiel | Le choix des projets | Analyse de valeur |
| | La définition de marchés cible | Liste de clients potentiels | Conception à Coût Objectif (CCO) |
| | | | |
| Créations conceptualisation | Définition du concept | Plan du concept | Mind mapping |
| | Création de l'équipe | Equipe | Ressources au sein de l'entreprise |
| | Conception technique | Plans technique | Outils de modélisation système (SysML) |
| Faisabilité | Briefing marketing à destination de la R&D | Compte rendu de réunion | Communication humaine entre ingénieur et commerciaux |
| | La validation financière et étude marketing du produit | Budget alloué au nouveau produit | Simulation financière (business plan avec SWOT) |
| Industrialisation | Essais sur le nouveau produit | Résultat d'essai prototype | Prototype |
| | Essai sur les lignes | Statistiques de production | AMDEC |
| | Réalisation du produit | Produit en grande quantité | Chaine de production existante |
| Lancement | Planification, Animation, Contrôle | Résultat de vente satisfaisant | 5 forces de porter, Matrice BCG, McKinsey, 4P du market mixte, Matrice Ansoff |

1.5.3. Une procédure technique :

Avec une telle procédure, la gestion de projet à des fins d'industrialisation a pour point focal l'aspect fonctionnel et technologique. Le tableau ci-dessous, est une généralisation des différentes étapes rencontrées lors du montage et de la réalisation d'un projet du Fonds Unique Interministériel [FUI]. Le FUI finance des projets de recherche et développement collaboratifs des pôles de compétitivité. il a vocation à soutenir des projets de recherche appliquée portant sur le développement de produits ou services susceptibles d'être mis sur le marché à court ou moyen terme tel que le projet SAHARA (Solution pour l'ArcHitecture et les Application des Réseaux sans fils dans les Aéronefs) qui est le projet appuyant cette thèse. Les livrables et résultats mentionnés sont ceux demandés par le FUI pour débloquer les financements.

| Phase | Etape | Tache/livrable/ résultat |
|-----------------|---|---|
| Amont de projet | Etat de l'art | Retour d'expérience |
| | | Etude marché des technologies existantes |
| | Montage | Définition du problème |
| Projet | Définition des exigences fonctionnelle | Spécification des exigences fonctionnelles |
| | | Liste d'application |
| | Préparation murissement et adaptation des technologies | Architecture fonctionnelle Liste des verrous technologique Sélection des technologies et proposition d'amélioration |
| | Fabrication et essai du démonstrateur | Dossier de conception Manuel utilisateur Plan de test démonstrateur |
| Aval du projet | Outils d'analyse de performance et tenue en environnement | Test fonctionnalité Test sécurité Test sûreté de fonctionnement Test fiabilité Test environnement |
| | Validation | Résultat des tests Analyse comparative entre exigences et résultats de tests |

1.5.4. Conclusion partielle

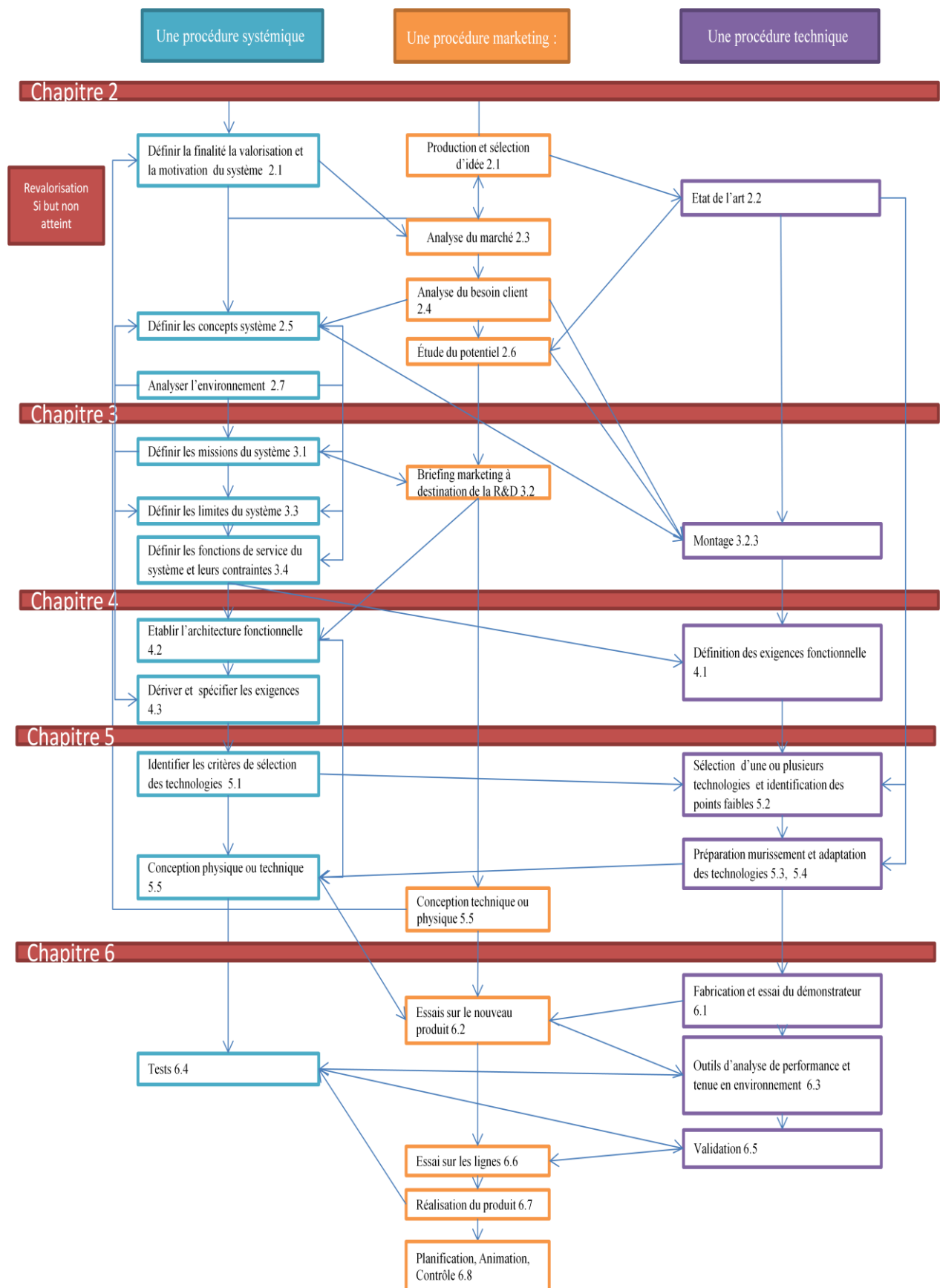
| Procédure | Processus | Point focal | Résultat |
|----------------------|----------------------------|---------------------------|---|
| Procédure technique | Gestion de projet | fonctionnel et technique | Un produit innovant qui fonctionne |
| Procédure marketing | Management de l'innovation | Commerciale et mercantile | Un produit innovant qui se vend bien (répond à un besoin) |
| Procédure systémique | Ingénierie système | Mission et priorité | Un produit innovant qui fonctionne et répond à un besoin (se vend bien) |

L'ingénierie système pourrait être un processus facilitant le compromis entre une procédure marketing et commerciale basée sur des spécifications d'exigence de parties prenantes utilisatrices et la procédure technique basée finalement sur des spécifications d'exigences fonctionnelles. Cependant il ne suffit pas de combiner les deux procédures pour obtenir la procédure systémique de l'ingénierie système. Chacun de ces processus apporte des résultats qui nous seront utiles pour réaliser le système qui nous intéresse : une gamme de réseaux de communication sans fil dont une implémentation est embarquée dans un aéronef.

Nous prendrons donc comme méthode de travail le processus d'ingénierie système auxquels nous imputerons des étapes intermédiaires extraites des deux autres processus.

Nous ne nous intéresseront dans cette thèse qu'aux étapes qui précèdent la construction physique à proprement dite du système.

1.5.5. Processus complet



1.6. Glossaire et concepts clefs

Ingénierie système : l'ingénierie système est une approche interdisciplinaire qui permet la réalisation d'un système. L'approche se focalise sur la définition des besoins utilisateurs et des fonctions requises très tôt dans le cycle développement

Milieu aérospatial : Dans notre cas, avion hélicoptère lanceur

Système de communication : Système permettant d'acheminer des données d'un point à un autre

Capteur : Élément passif ou actif permettant de convertir une grandeur physique en information compatible de l'entrée d'un nœud (ou d'un concentrateur).

Réseau de capteur : Ensemble de capteurs liés par des systèmes de communication à des centres de décision

Classes d'application : Regroupement des utilisations similaires du système par domaine (Avions, hélicoptères et lanceurs).

Système : En général, ensemble d'éléments (logiciel, matériel ou humain) en interaction mutuelle et en interaction avec l'environnement, organisé en fonction d'un but. Dans notre cas, ensemble constitué d'un concentrateur et d'un ou plusieurs nœuds communiquant ensembles.

Système complexe : Système dont les propriétés et le comportement résultent de l'interaction de plusieurs constituants qui peuvent eux même être des systèmes. On les appellera alors sous système

Module : Constituant unitaire du système (dans notre cas Concentrateur, Routeur ou Terminaison.).

Produit : Éléments matériel présenté à l'issue du projet : modules du démonstrateur permettant la réalisation d'un ou plusieurs systèmes.

Gamme de produit : Ensemble de produit ayant en commun un ou plusieurs modules mais dont chaque produit possède un ou plusieurs modules spécifiques

Concentrateur : Élément concentrant les informations d'une ou plusieurs terminaisons (par une liaison RF), disposant ou pas disposant d'une ou plusieurs interfaces capteur et raccordé au système hôte : apport énergétique et liaisons de communication.

Routeur : Élément concentrant les informations d'une ou plusieurs terminaisons (par une liaison RF), disposant ou pas disposant d'une ou plusieurs interfaces capteur. Mais ne disposant pas de raccord avec le système hôte.

Réseau SAHARA : Ensemble constitué d'un concentrateur, éventuellement un ou plusieurs routeurs et d'au moins un terminal communiquant ensembles.

Système hôte : Système intégrant un ou plusieurs réseaux SAHARA.

Terminal : Satellite autonome disposant d'une liaison RF avec un ou des modules et disposant d'une ou plusieurs interfaces capteur.

Qualification : C'est la somme des différentes étapes, respect des règles, vérifications, validations, tests permettant de s'assurer que l'équipement est fiable pour être autorisé à être installé dans un aéronef.

Certification : Une certification est donnée par un organisme agréé. C'est une étape formelle permettant une utilisation commerciale de l'équipement sur aéronefs.

Analyse des exigences : Elle a pour objectif de spécifier toutes les fonctions et propriétés que devra avoir le système pour répondre à ses missions. La spécification des exigences s'intéresse donc au quoi (que doit faire le système ? quelles doivent être ses performances et aptitude) et non au comment (pas d'apport de solution technique qui relève plus du travail de conception)

Vérification : Contrôle de l'implémentation d'une exigence.

Validation : Contrôle de la complétude de couverture d'une exigence.

Ingénierie système : L'ingénierie des systèmes est une approche scientifique interdisciplinaire, dont le but est de formaliser et d'appréhender la conception de systèmes complexes avec succès.

Cycle de vie : Correspond à toute l'utilisation du produit dans son environnement cible. Pour les lanceurs : de l'installation des modules jusqu'à la désintégration de l'étage après son tir. Pour les avions et les hélicoptères, cela correspond à un vol en incluant les phases de préparation et vérification avant et après ce dernier. (Un second cycle, plus large est à inclure : il correspond à la vie de l'appareil)

Modes de fonctionnement : Le fonctionnement du produit SAHARA peut se décomposer en sous ensemble avec des caractéristiques, des possibilités ainsi que des réactions différents (ex. : actif, veille, initialisation, mesure, transmission nominale ou dégradée, ...). Ces différents sous-ensembles sont appelées modes de fonctionnement du produit

Phases du cycle de vie : Décomposition du cycle de vie en parties qui peuvent avoir des caractéristiques différentes. Chaque phase peut être associée à un ou plusieurs modes de fonctionnement.

Vieillessement /latence maximale : On appelle vieillissement d'une donnée le temps qui s'écoule entre sa production et sa mise à disposition de l'émetteur dans une trame en vue de son émission RF.

2. Approche opérationnelle en phase amont (phase de montage et de préparation) d'un projet de conception d'un système innovant

Définition de l'innovation : Le manuel d'Oslo de l'Organisation de Coopération et de Développement Economique (OCDE) propose les définitions suivantes: « On entend par innovation technologique de produit la mise au point/commercialisation d'un produit plus performant dans le but de fournir au consommateur des services objectivement nouveaux ou améliorés. Par innovation technologique de procédé, on entend la mise au point/adoption de méthodes de production ou de distribution nouvelles ou notablement améliorées. Elle peut faire intervenir des changements affectant – séparément ou simultanément – les matériels, les ressources humaines ou les méthodes de travail »

Non seulement l'innovation de façon macroscopique a un rôle déterminant dans l'impulsion du système économique comme le décrit Dès 1912, Joseph Schumpeter dans la « Théorie de l'évolution économique » [Schumpeter] l'Innovation comme un moteur sinon le moteur de l'Economie. Mais force est de constater aussi qu'à l'échelle de l'entreprise l'innovation (produit ou procédé) sur un marché peut:

- Rendre l'entreprise plus compétitive et entraîner la concurrence à s'aligner
- Entraîner le monopole de l'entreprise sur le nouveau produit
- Rendre libre l'entreprise d'imposer son prix de vente et ainsi dégager un maximum de bénéfices.
- Augmenter la demande, car l'innovation qui apparaît crée de nouveaux besoins.

Le succès d'une innovation ne dépend pas seulement de la performance technologique d'une entreprise. L'ensemble de ses ressources (humaines, techniques, financières, ...) sont en effet des facteurs clé de la réussite d'un projet innovant. Par définition, l'innovation se fonde sur une idée originale. Mais l'innovation réside principalement dans la capacité à transformer ces idées en succès commerciaux. Il existe des méthodes et techniques de travail qui encadrent le processus d'innovation. Malheureusement ces méthodes posent souvent problème. En effet, d'un côté, des ingénieurs sont chargés de la conception d'un nouveau produit. Ils sont créatifs et ont les compétences techniques. D'un autre côté il y a les services orientés « commerce », qui eux sont chargés de promouvoir et de vendre le produit. Maîtrisant une certaine conscience du marché et une connaissance de leur clientèle On peut donc diviser le personnel d'une entreprise (en implication direct avec l'innovation) en deux équipes

| L'équipe commerciale | L'équipe technique |
|--|--|
| + une conscience du marché et une connaissance des besoins | + compétences techniques |
| + une vision commerciale du produit | + créativité scientifique |
| - compétences techniques | - une conscience du marché et une connaissance des besoins |
| - créativité scientifique | - une vision commerciale du produit |

Ces deux équipes sont parfaitement complémentaires d'un point de vue logique et l'innovation devrait être le fruit d'une collaboration, seulement ces deux équipes ne communiquent pas. (§3.2.1)

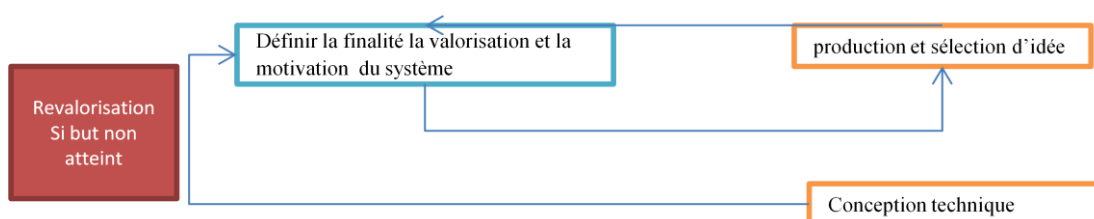
2.1. Une idée, une finalité :

A l'origine de toute innovation on trouve une idée souvent apparue pour une finalité. D'après Peter F. Drucker, le controversé consultant en management autoproclamé écologiste social, l'innovation en général résulte d'un changement (de la structure industrielle, du marché, de la démographie local et globale, et de la perception humaine) dans le savoir faire scientifique déjà disponible. Joseph F. Engelberger (le père de la robotique) affirme que l'innovation requiert seulement trois éléments: un besoin identifié, la compétence des concepteurs et un support financier mais c'est sans compter le hasard et autres aléas de la recherche. En effet une idée peut aussi être issue

- D'un heureux hasard apparu au cours de recherches sur d'autres sujets techniques, (la pénicilline d'Alexander Flemming)
- D'une revalorisation d'un résultat technique qui n'a pas atteint son objectif initial. (le post it de Spencer Silver)
- Elle peut être la réponse à un nouveau besoin client ou à un besoin qui a évolué (de « smallworld » à « facebook »)
- Elle peut émerger lors d'un brainstorming.
- Elle peut aussi être le résultat du développement d'une vision peu claire au départ mais révolutionnaire pas la suite ou très spécifique mais complètement détournée par la suite (Satellite GPS NAVSTAR)

Exemple de post it : En 1970, la société américaine 3M, découvre, lors de recherches effectuées sur un produit qui n'avait rien à voir avec le Post-it, un adhésif qui colle sans coller tout en collant tout de même. Par acquit de conscience, il envoie des échantillons de sa découverte à d'autres laboratoires du groupe 3M sans qu'on trouve d'applications intéressantes dans l'immédiat pour ce produit surprenant. Il faudra attendre 10 ans pour qu'Arthur Fry, un autre chercheur du groupe 3M, trouve par hasard un débouché au futur Post-it : en effet, membre d'une chorale, il cherchait un moyen pour signaler les pages de ses partitions sans abîmer pour autant le papier. C'est ainsi qu'en 1980 il enduit d'une mince couche de ce fameux adhésif « inconnu » les marques-pages volants de ses partitions... et ça marche ! Les petits papillons de papier aux couleurs tendres, qui se collent, se décollent, se recollent à volonté étaient nés. Le nom commercial de « Post-it » a été créé en 1981

Quoiqu'il en soit, on peut toujours essayer de modéliser et de catégoriser les sources des idées d'une innovation mais souvent et ce sera notre cas l'idée prend sa source dans plusieurs de ces catégories. L'idée qui est pourtant la genèse d'une innovation est l'étape qui peut être stimulé mais difficilement contrôlée.



2.1.1. Constat de la situation :

Ce sujet est un sujet innovant personne jusqu'alors n'a fait de constat réel de la situation actuelle concernant les capteurs. Un aéronef comporte (selon le cas) entre 500 et 2000 capteurs. Ces capteurs servent à donner des informations qui facilitent la navigation ou la maintenance. Ils sont utilisés pour la mesure de divers paramètres (températures, pressions, positions...) et les résultats sont ensuite acheminés par des fils vers les calculateurs de bord qui les traitent. Ceci engendre des centaines de kilomètres de câbles, une grande complexité de design et de fabrication, des problèmes de fiabilité notamment au niveau des connexions et une masse importante. Sur un Airbus A380 par exemple, on compte 500 kilomètres de câbles pesant près de 3 tonnes. Une partie de ces câbles sont des canaux de communication entre capteur et centre de décision. L'ensemble de ces installations augmente grandement la complexité de fabrication et les aléas associés.

L'idée de remplacer des réseaux de câble reliant les capteurs des aéronefs par du sans fil vient d'un besoin des équipementiers et des compagnies aériennes d'avoir des appareils toujours plus légers plus fiables et mieux instrumentés.

2.1.2. Finalités désirées

Au départ la motivation était principalement l'allègement mais au vue des technologies disponibles à l'époque, les constructeurs ont vite compris que remplacer des câbles par des réseaux sans fil impliquait une indépendance énergétique et donc un ajout de batterie (qui pesaient aussi lourd que les câbles si ce n'est plus...). La motivation a donc été focalisée sur la malléabilité de l'instrumentation, car en ce qui concerne la fiabilité, effectivement les câbles qui tombent en panne posent de gros problèmes à la maintenance (difficile à localiser et à changer : implique de démonter la portion de fuselage dans lequel il est niché) mais les réseaux sans fil posent d'autres types de problèmes de fiabilité (sans compter les problèmes de sécurité).

- Une meilleure connaissance de l'environnement et de la santé de l'aéronef (par l'installation du système dans des zones difficiles d'accès ou déjà construites et non démontables)
- Une réduction du poids (par une réduction du câblage donc du volume et du poids)
- Une réduction de la complexité (par une simplification du réseau et du matériel embarqué)
- Une augmentation de l'évolutivité (par la malléabilité due à la facilité d'implémentation : plus besoin de tirer des câbles pour installer de nouveau capteurs)
- Une augmentation de la flexibilité (par la modularité du à l'architecture optimisée du système)
- Une augmentation de la fiabilité par la possibilité d'ajouter des redondances de signal sans modifier le poids ni le pourcentage d'encombrement et par le repérage immédiat d'une défaillance sans avoir à localiser le câble responsable

2.1.3. Idées proposées et sélectionnées

Plusieurs options quant au mode de propagation et aux types d'onde propagés sur le réseau sont envisagées. Parmi les ondes mécaniques, les ondes acoustiques étaient candidates puisque n'ayant pas besoin de support (ce qui est notre principale problématique) et parmi les ondes électromagnétiques la piste des ondes lumineuses a été explorée (des applications cabines sont étudiées en Allemagne). Mais l'option des ondes radio est apparue assez rapidement comme une évidence puisque ce sont les ondes les plus communément utilisées pour transporter de l'information et que le temps qui était imparti au projet SAHARA par le FUI ne nous permettait pas de lancer la machine de l'innovation à partir d'un point aussi reculé. Ceci dit si le besoin était moins urgent ces pistes présentaient de nombreux avantages concernant la sécurité et la problématique CEM (pas d'interférences avec le reste de l'avionique) malgré le fait que l'architecture d'un aéronef risquait d'être un obstacle de taille pour ce type d'onde (ces ondes lumineuses ne passent pas les matériaux du fuselage et les ondes sonores auraient pu être désagréable pour les passagers ou les animaux)

2.2. Un état de l'art

Après avoir sélectionné une idée tout en ayant défini la finalité du système qui en résulte, voici un état de l'art technologique listant toutes les technologies susceptibles de convenir au système ainsi que le retour d'expérience sur des projets qui traitent du même type de sujet.



Grace au retour d'expérience il sera possible de souligner les erreurs à ne pas faire ainsi que les verrous technologiques non levés et de disposer d'une liste complète des technologies existantes envisageables.

Simultanément il conviendra de faire une analyse du marché de la concurrence qui sera non seulement basée sur l'idée produite et sélectionnée mais aussi orientée par la motivation du système qui en découlera car en fonction de la motivation un système ne sera pas conçu de la même façon. La concurrence pourra être selon le cas existante, pertinente, potentielle ou absente.

2.2.1. Retour d'expérience

2.2.1.1. Projets aérospatiaux

WISE : (projet Européen FP6): WIREless SEnsors. Ce projet a développé des capteurs sans fils basés sur la technologie Zigbee pour avion et hélicoptère. [WISE] <http://www.wise-project.org/index.php?content=description>

Résultat : Dans les conclusions du projet [PRWISE], il est dit que les informations venant des capteurs cessaient d'être transmises lorsque les volets de l'avion étaient levés.

Ce que nous apprend ce projet : un verrou technologique crucial n'a pas été levé dans le sens où le capteur fonctionnait au sol mais pas en vol. On peut aussi émettre une première hypothèse qui seraient que l'architecture du réseau ne prenait pas en compte la mobilité des volets et bloquaient donc la bonne propagation de l'onde. D'autres hypothèse aussi pourraient

être émise comme le fait que les volets seuls ne seraient pas responsables de la mauvaise transmission, et que l'effet est couplé avec les interférences dus à l'avionique embarquée. Il faudra donc prendre en compte ces contraintes dans l'élaboration de notre système.

SACER : (projet Pole de compétitivité Aerospace Valley, AIRBUS partenaire) : Le but de ce projet est l'instrumentation des structures aérospatiales (aile, fuselage, moteur) pour les essais en vol. [SACER] <http://spiderman-2.laas.fr/Club-Affilies/documents/Seminaire23-11-2006/PDF/pres-sace.pdf>

Ce que nous apprend ce projet : Dans ce projet, il n'y a pas eu de certification mais une démonstration que les informations mesurées sont vraies et peuvent donc servir de base à l'obtention de la certification. Le point focal n'était donc pas les contraintes d'intégrité des données transmises puisque les applications d'essais en vol ne l'exigeaient pas. Ce ne sera pas le cas de nos applications mais les recommandations quand aux exigences concernant la consommation énergétique (faire fonctionner le système avec une pile AA était un point névralgique de ce projet) sont intéressantes puisqu'elles ont été atteintes

SWANS: Smart wireless architecture network sensors (projet EUREKA/MEDEA+)[SWANS]

Le projet SWANS (terminé en 2009) avait pour objectif de réaliser un capteur de fissure capable de traiter des données sur petit volume (~20 cm³) et de les transmettre sans fil. Ce système est envisageable pour plusieurs types de capteur mais SWANS s'est focalisé sur les systèmes de « contrôle de santé de l'aéronef ». Le projet est terminé des tests ont été réalisés mais sur le capteur et ses performances (il a été testé avec plusieurs tailles de fissure il rapporte l'évolution de celle-ci et donne aussi des informations sur la température et la pression).

Ce que nous apprend ce projet : Même s'il était focalisé sur les capteurs et non pas sur la transmission d'information sans fil, il est intéressant de noter dans ce projet que la technologie Zigbee a été utilisée pour établir la liaison radio qui recueillait des données utilisées par le personnel d'entretien. Ce standard a été choisi en raison de sa faible consommation d'énergie (30 mA en mode actif, 1,3 μ A en mode hors tension), son débit de données (250 Kbits / sec) et sa portée de transmission de données (jusqu'à 100 mètres). La problématique de la transmission en vol n'a pas été abordée comme elle le sera pour les applications que nous avons choisi mais la dimension de portée sera importante pour nous aussi et comme pour le projet SACER on peut déduire que le ZIGBEE n'est pas trop énergivore.

SWAN (allemand): Sensor wireless autonomous network. [SWAN] Ce projet avait pour objectif d'optimiser l'entretien des aéronefs, leur fonctionnement et leur utilisation, les composants du système avionique doivent être surveillés continuellement au cours de leur vie. SWAN est un catalyseur pour la maintenance préventive en général.

Ce que nous apprend ce projet : Les capteurs amovibles et dont la plate-forme de réseau est fiable n'existent pas actuellement. Il faut noter aussi que des adaptations du protocole de transmission sans fil (modification de la couche mac) seront nécessaires afin de répondre aux exigences de consommation d'énergie. Dans ce projet (dont les conclusions sont

confidentielles et difficiles à obtenir même si EADS Allemagne fait parti du consortium, ils partagent peu, leur résultats avec la France...) le parti a été pris de modifier les technologies sans fil existante au lieu d'en trouver une approximativement adaptée.

AUTOSENS: AUTOonomous SENSing microsystem (projet Fondation Aéronautique et Espace, en cours) [AUTOSENS] : Le but de ce projet est de concevoir et réaliser un microsystème de gestion de l'énergie bi-modulaire d'une part pour l'alimentation de capteurs embarqués et d'autre part pour l'interface communicante. AIRBUS est partenaire. Le principe étant d'instrumenter des structures aérospatiales (aile, fuselage, moteur) pour faire du contrôle de santé de structure. Il s'agit la d'évaluer la possibilité d'exploiter et stocker les vibrations mécaniques (récupérer l'énergie de vibrations) pour alimenter un système de contrôle de santé de structure aérospatiale en vol (capteur SHM). Le LAAS a pour cela réalisé un prototype de capteur piézoélectrique ainsi qu'une super capacité. Ils expérimentent également la conversion d'énergie thermo électrique, et étudient par simulation l'électronique de conversion. Cette dernière est à l'heure actuelle le point bloquant. http://www.fnrae.org/1-39841-Detail-projet.php?id_theme=2&id_projet=7

Ce que nous apprend ce projet : le point focal de ce projet n'est, ni les capteurs, ni les réseaux de communication mais la récupération d'énergie de façon autonome pour alimenter des modules eux aussi autonomes comme les capteurs de contrôle de santé de l'aéronef (un exemple parmi d'autres). Ce projet est complémentaire au notre en effet nous avons choisi (mais nous expliquerons les raisons de ce choix plus tard) de ne pas traiter les aspects énergétiques alors que c'est l'une des problématiques majeures de notre système. Notre projet sera une parfaite application d'AUTOSENS. On apprend aussi que des tests ont été réalisés sur des super capacités afin de venir compléter l'énergie vibratoire récoltée qui pour le moment n'est pas suffisante

ASTRAL: Autonomous System for TRANsmission WireLess (CEA-DRT, 3DPlus et EADS Astrium) [ASTRAL]

Afin de démontrer la validité du concept de technologie sans fil applicable au domaine aéronautique et aérospatial, le projet ASTRAL vise à réaliser un démonstrateur représentatif en milieu spatial. Cet objet intégrera un réseau de capteurs d'attitude alimentés par une source d'énergie autonome. Les capteurs triaxes seront de type accéléromètre et magnétomètre, adaptés à la mesure de vibrations auxquelles peuvent être soumis un satellite; la communication sera assurée dans la bande des 2,45 GHz. http://www.fnrae.org/1-39841-Detail-projet.php?id_theme=2&id_projet=6

Ce que nous apprend ce projet : bien que ce projet soit focalisé sur des applications spatiales (moins limitatives que celles qu'on envisage puisqu'on souhaite que notre système soit intégrable aussi bien dans un avion que dans un hélicoptère ou dans un lanceur) il est intéressant de constater qu'ici encore on choisi la bande 2,45 pour émettre (bande du wifi du ZigBee et d'autres protocoles)

2.2.1.2. Projets non aérospatiaux ayant un axe commun

GTB et domotique (programme HOMES de Schneider, WATTECO) : WATTECO, société française spécialisée dans les solutions innovantes de communication dédiées à la gestion énergétique de l'habitat, lance sur le marché un baromètre énergétique, baroWatt™, affichant la consommation électrique du foyer.

Ce que nous apprend ce projet : Le déploiement massif de dispositifs (capteurs intelligents) d'économie d'énergie implique de considérer les contraintes de mémoires, de fiabilité, d'interopérabilité et d'acheminement (en effet les protocoles nécessitant l'intégralité des informations d'état de liaison ne peuvent être envisagés). WATTECO a donc choisi la norme IPV6 car elle permet un déploiement à grande échelle grâce à son espace d'adresse étendu (2^{128} adresses au lieu de 2^{32} pour IPV4).

Télésanté : Le 21 juillet 2006, le nouvel hôpital de Kansas City a achevé les tests sur un système de traçabilité incluant des étiquettes RFID passives pour déterminer si la technologie pouvait améliorer les processus impliqués dans l'admission et le traitement de patients au service des urgences de l'hôpital. Pendant le test, qui a duré plusieurs semaines, on a donné aux patients des étiquettes RFID-PERMISS émettant à 2.4 GHz quand ils ont été admis. Les étiquettes ont été associées aux numéros d'identification des patients lors de leur admission, puis dissocié quand les patients sortaient. Des balises RF stratégiquement placés écoutaient périodiquement les étiquettes RFID à l'intérieur de l'hôpital par le protocole de communication sans fil ZigBee. Les balises transmettaient les données à un concentrateur qui calculait la position du signal envoyé (et donc de l'étiquette). Le test a révélé que ce dispositif permettait de mieux localiser les patients ainsi que d'assurer l'efficacité du personnel hospitalier.

Ce que nous apprend ce projet : la technologie RFID est bien adaptée à des applications dont l'activité n'est pas nécessaire en permanence (typiquement pour du contrôle de santé au sol) ce qui permet aussi une belle économie d'énergie.

Suivi des infrastructures et de l'environnement : De nombreuses PME (en France comme à l'étranger) développent leurs propres produits de surveillance et proposent des solutions personnalisées. INNODEV est une jeune société fondée en 2004 par un groupe d'ingénieurs spécialisés dans les télécommunications. Leur production se concentre sur le développement de solutions personnalisées pour la surveillance d'infrastructure. Le choix technologique de cette entreprise comme celui de beaucoup d'autres s'est porté sur le ZigBee.

JACQUES PANCHARD [Panchard] Ingénieur diplômé en Systèmes de Communication de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne en Suisse a soutenu une thèse sur l'instrumentation de l'agriculture indienne en capteur sans fils. Il a établi un état de l'art sur ce qui a été fait dans les pays en voie de développement sur le sujet. Le choix technologique concernant le protocole s'est souvent porté sur le 802.11b

Ce qu'on peut déduire de ces types de projet : pour des applications nécessitant des portées autour de 100m on préférera toujours des fréquences 2.4 type ZigBee ou 802.11

Le projet ANR OCARI [OCARI]: (Optimisation des Communications Ad hoc pour les Réseaux Industriels) a proposé une architecture et une pile protocolaire de réseaux de capteurs sans fil pour applications industrielles.

Ce qu'on peut déduire de ce projet : OCARI se distingue des piles protocolaires comme ZigBee, WirelessHART et ISA100.11a.

- Une méthode d'accès au médium RF déterministe supportant le relayage de paquet en temps contraint
- Une stratégie de routage pro-active prenant en compte l'énergie résiduelle des nœuds et supportant le nomadisme
- Un mécanisme d'ordonnancement des activités par coloriage à 3 sauts permettant de réduire les interférences et donc d'optimiser l'énergie des nœuds

2.2.2. Groupe d'étude

2.2.2.1. Pôle NASA

Deux groupes d'étude (dont la NASA fait partie) ressortent tout particulièrement lorsqu'il s'agit de problématique sans fil

WAIC : Wireless Avionics Intra-Communications [WAIC] est un groupe d'étude dont les activités principales sont :

- Etudier la sûreté vis-à-vis des systèmes critiques intra aéronef en contact avec des systèmes sans fil
- Etudier les bandes de fréquence et trouver celles qui seront en adéquation avec les contraintes aérospatiales et les technologies utilisées
- Définir et soumettre la bande de fréquence à l'ITU : autorité de certification.

<https://avsi-tees.tamu.edu/PublicWeb/WAICPublic/waic2.htm>

Les entreprises impliquées dans ce groupe d'étude : Airbus/EADS, BAE Systems, Boeing, Continental Airlines, Embraer, GE Aviation, Goodrich, Honeywell, NASA

Projet actuel : répondre aux cinq questions suivantes (en cours)

- Question 1 : Quel type de systèmes filaire déjà existants et de nouvelles applications seront envisagés afin d'y implémenter le système
- Question 2: Quelle est le niveau de criticité de ces applications
- Question 3: Quelles sont les exigences en critère de protection d'objectif de performances au niveau des caractéristiques techniques, opérationnelles et de la bande passante qui devraient être associés au systèmes WAIC utilisés pour les applications
- Question 4: Quels sont les systèmes WAIC qui pourraient coexister à la même bande de fréquence déjà utilise sans créer d'interférences
- Question 5: Quelles techniques pourraient être utilisé par le système WAIC afin d'assurer la compatibilité avec les autres applications et les services radio

Buts finaux : Trouver la bande de fréquence à utiliser et obtenir une première certification

WAIC est un groupe à suivre car largement impliqué dans la décision de l'attribution des bandes de fréquence par l'ITU [ITU]

Ils ont établi une liste d'applications capteurs que l'on souhaite voir transformées en capteur sans fil que vous trouverait en **annexe 2** classés selon deux critères : intérieur/ extérieur et haut débit/bas débit

Fly by Wireless (caneus)[FBW]: <http://www.caneus.org> CANEUS International est un organisme à but non lucratif qui sert les besoins de l'aéronautique, de l'espace et de la défense, en favorisant le développement international de la Micro et Nano Technologies (MNT) pour des applications aérospatiales. CANEUS est axé sur les aspects pratiques de la transition rapide et efficace MNT des concepts au niveau du système aéronautique. Pour atteindre cet objectif, CANEUS rassemble des développeurs de technologies de l'aérospatial, des utilisateurs finaux, des décideurs gouvernementaux et des investisseurs. CANEUS dirige et coordonne les efforts des entités au Canada, aux États-Unis, en Europe et dans d'autres pays, comme le Japon et le Brésil

[STUDOR] Fly by Wireless a intéressé CANEUS dans le sens où les capteurs utilisés tendent à devenir des MEMS (Microelectromechanical systems) ou mieux encore des capteurs intelligents. Aussi ce groupe d'étude s'échange des informations sur les avancées technologiques concernant ce sujet.

2.2.2.2. Pôle ESA

La conférence WireSens4space 2009 du 1er au 2 octobre 2009 à Santorin a été la source principale de notre information sur les projets menés par l'ESA.

Un programme structurant appelé *Low Power Proximity Network of Sensors* LPPNS, et qui semble faire écho aux programmes de la NASA a pour objet de mettre en réseau des capteurs dans l'espace: le but est aussi de créer un écosystème favorable à l'émergence de solutions industrialisées, fiables et à bas coûts. Dans la même veine, citons le projet *Autonomous Wireless Sun Sensors* AWSS pour suivre les évolutions du soleil. Notons enfin l'étude de communications optiques au sein d'un satellite avec EADS Astrium, qui conclut à l'inadaptation de cette technologie en présence d'obstacles à la propagation. Les programmes menés par la NASA et par l'ESA semblent assez similaires dans les buts poursuivis, avec une émulation certaine.

2.2.2.3. Quelques conférences dédiées à ces sujets

- Conférence WireSens4space, 1-2 octobre 2009, Santorin
- Energy Harvesting for Wireless Automation Conference, 24-25 mars 2010, Munich
- CANEUS Fly-by-Wireless Workshop, 24-27 août 2010, Orono, Me, USA
- World Telecommunication Development Conference juin 2010 Hyderabad, India

2.2.3. Technologies existantes

2.2.3.1. Technologie disponibles sur le marché (détaillé dans l'annexe 1)

Un réseau sans fil est un réseau informatique ou numérisé qui connecte différents systèmes entre eux par ondes radio. Il peut-être associé à un réseau de télécommunications filaires pour réaliser des interconnexions entre nœuds.

Deux organismes gèrent la normalisation des bandes de fréquences attribuées aux réseaux sans fil. L'américain est le centre IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) et le centre européen est L'ETSI (European Telecommunications Standards Institute). Une fois les normes établies, des commissions distribuent ces fréquences aux utilisateurs selon la taille du réseau créé.

Du côté américain on obtient donc grâce à la FCC (Federal Communications Commission):

- RAN : IEEE 802.22
- WAN : IEEE 802.20 et IEEE 802.16e
- MAN : IEEE 802.16d WiMax
- LAN : IEEE 802.11 Wi-Fi Alliance

Quatre amendements à la norme IEEE 802.11 :

- IEEE 802.11a : spectre de radiofréquences 5 GHz incompatible avec le spectre 2,4 GHz
- IEEE 802.11b : spectre de radiofréquences 2,4 GHz débit de données maximum de 11 Mbits/s
- IEEE 802.11g : spectre de radiofréquences 2,4 GHz débit de données maximum de 56 Mbits/s
- IEEE 802.11n : spectre de radiofréquences 2,4 GHz débit de données maximum de 540 Mbits/s
- IEEE 802.15
- PAN : IEEE UWB, Bluetooth, Wi-Media, BTSIG, MBOA

Du côté européen pour les mêmes types de réseaux la CEPT (Conférence Européenne des Postes et Télécommunications) organise ses fréquences de cette manière :

- WAN : 3GPP(GPRS/UMTS), 3GPP2(1X--/CDMA), GSM, OMA
- MAN : ETSI HiperMAN & HiperACCESS
- LAN : ETSI-BRAN HiperLAN2
- PAN : ETSI HiperPAN

En France ce sont l'ART et l'ARCEP qui gèrent cette distribution.

Le but est de mettre en place des réseaux robustes et à faible consommation de capteurs ou actionneurs dans des endroits difficiles d'accès, à faible taux de cycle, dans un environnement obstrué et perturbé, pour des applications aéronautiques et spatiales non critiques.

Etant donné la taille du réseau qui nous intéresse (échelle : un avion un lanceur ou un hélicoptère) on envisagera les Wireless Personal Area Network (WPAN) et les Local area network LAN, et particulièrement:

- La norme IEEE 802.15.1
- La norme IEEE 802.15.3
- La norme IEEE 802.15.4
- La famille de norme IEEE 802.11
- Le standard ZigBee
- Le standard Bluetooth
- Le standard ISA100
- Le standard WirelessHart
- La norme 6LoWPan
- WiFi Low Power
- WiDom

2.2.3.1.1. La norme IEEE 802.15.1

La norme IEEE 802.15.1 spécifie les couches physiques et MAC pour des connexions sans fil avec des équipements fixes ou mobiles autour de la personne ou d'un objet. Elle vise des solutions peu chères, robustes, efficaces en énergie, supportées par une large gamme d'équipements. Cette norme est basée sur la technologie initialement développée par le groupe Bluetooth Special Interest Group.

2.2.3.1.2. La norme IEEE 802.15.3

La norme IEEE 802.15.3 spécifie les couches MAC et physique pour des réseaux radio sans fil de type WPAN (équipements fixes ou mobiles autour de la personne ou d'un objet) à haut débit (11 à 55 Mbit/s). Elle a été conçue pour le transfert de fichiers audio et vidéo en streaming. Cette norme dispose de capacités accrues en termes de portée, de bande passante et de débit de connexion. Elle est compatible avec les autres normes 802.15 pour réseaux WPAN (réseaux personnels sans fil).

2.2.3.1.3. La norme IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 peut travailler sur trois bandes de fréquences différentes : 868 MHz pour la région Europe, 915 MHz pour l'Amérique du Nord, et 2,4 GHz pour une couverture mondiale. La norme prévoit deux couches physiques différentes (PHY), une pour le 868/915 MHz (PHY868/915) et une seconde pour le 2,4 GHz (PHY2450).

Au total, 27 canaux (numérotés de 0 à 26) sont répartis sur ces trois bandes. Cette diversité en termes d'utilisation du spectre radiofréquence permet à la technologie de répondre aux nombreuses réglementations et d'être utilisable sur toutes les régions du globe mais aussi de s'adapter aux environnements pollués (four à micro-onde, appareils RF, WiFi, Bluetooth...). Actuellement, les premiers produits disponibles utilisent majoritairement la bande 2.4 GHz.

2.2.3.1.4. La famille de norme IEEE 802.11

La famille IEEE 802.11 spécifie un contrôle d'accès au médium et plusieurs couches physiques pour pouvoir connecter en sans fil des équipements fixes, portables ou mobiles dans une zone locale donnée. Elle utilise des techniques de modulation qui utilisent le même protocole de base. Les plus populaires sont les protocoles 802.11b, et 802.11g qui utilisent la bande de fréquence des 2,4GHz. C'est pourquoi les nœuds 802.11 peuvent parfois souffrir des interférences causées par les fours micro-ondes, les téléphones sans fil et les équipements Bluetooth. Alors que Bluetooth utilise le saut de fréquence FHSS, le 802.11b et le 802.11g utilisent respectivement, la signalisation DSSS, direct sequence spread spectrum signaling et la méthode OFDM, orthogonal frequency division multiplexing. Le 802.11a utilise la bande des 5GHz, offrant 19 canaux distincts. La sécurité a été renforcée dans le 802.11i. Le 802.11n propose une nouvelle technique de modulation multi-streaming. Les autres standards de la famille (c-f, h, j) sont des amendements.

2.2.3.1.5. Le standard ZigBee

ZigBee cible les réseaux sans fil utilisés pour la télésurveillance et les applications de contrôle. Il se veut offrir une solution simple, fiable, et de faible coût pour des réseaux à faible débit et faible consommation énergétique. ZigBee est promu par la ZigBee Alliance, une alliance d'industriels. La technologie ZigBee vise une très large gamme d'équipements (i.e. tout équipement usuel susceptible de communiquer en sans fil) ainsi que plus généralement les marchés industriels, commerciaux et gouvernementaux.

ZigBee s'appuie sur le standard IEEE 802.15.4 pour les couches physique et MAC.

2.2.3.1.6. Le standard Bluetooth

Bluetooth est une technologie sans fil standardisée pour échanger des données à courte distance entre équipements fixes ou mobiles dans le cadre des réseaux personnels sans fil (WPAN) avec de hauts niveaux de sécurité. Créée par Ericsson en 1994, elle se voulait une alternative aux câbles RS-232. Le standard Bluetooth est géré par le Bluetooth Special Interest Group.

Afin d'assurer une compatibilité entre tous les périphériques Bluetooth, la majeure partie de la pile de protocoles est définie dans la spécification. Il est à noter que les couches basses sont développées en hardware, tandis que les couches hautes sont développées en software. L'interface HCI fournit une méthode uniforme pour accéder aux couches matérielles. Son rôle de séparation permet un développement indépendant du matériel et du logiciel. HCI permet un transfert de données à débit maximum, soit 720 kbit/s pour la norme 1.2, et un débit trois fois plus élevé pour la norme 2.0+EDR.

2.2.3.1.7. Le standard ISA100

ISA100 est un standard ouvert de technologies réseaux sans fil [ISA100.11a, 2009]. Il concerne les systèmes sans fil pour l'automatisation industrielle, et plus particulièrement le contrôle de process et les applications qui y sont liées.

L'objectif principal d'ISA100 est de fournir un standard unique pour les réseaux sans fil, permettant d'utiliser plusieurs protocoles et plusieurs applications. Le domaine d'ISA100 est le

niveau terrain au travers d'un LAN. Le champ applicatif visé concerne surtout les applications non critiques de surveillance (de type alerte, ou de type monitoring), et dans une moindre mesure les applications de contrôle ou de sûreté. ISA100 est particulièrement adapté aux applications de monitoring périodique, et au contrôle de process lorsque des délais de 100 ms sont tolérables.

De manière générale, ISA100 offre les caractéristiques suivantes : des temps de latence supérieurs à 100 ms, la possibilité pour certains équipements d'avoir une faible consommation énergétique, le passage à l'échelle des équipements, la robustesse et la résistance aux interférences en environnement industriel sévère. ISA100 assure la coexistence avec de nombreux protocoles sans fil tels que WiFi (802.11x), WiMAX (802.16x), Bluetooth, WirelessHART, etc. ISA100 fournit aussi des services de sécurité.

2.2.3.1.8. Le standard WirelessHart

WirelessHart est un standard industriel qui vise à assurer une solution sans fil pour les réseaux de capteurs sans fil utilisés dans des applications ayant de fortes contraintes temporelles. WirelessHart a adopté un mécanisme de sauts de fréquences qui lui permet de résister aux interférences et aux effets des obstacles qui sont deux caractéristiques essentielles d'un environnement industriel.

La pile protocolaire d'un réseau WirelessHart est constituée de 5 couches : une couche physique, une couche MAC, une couche réseau, une couche transport et une couche application. Une entité spécifique appelée Network Manager prend en charge la constitution des tables de routage des nœuds du réseau et le séquençement des échanges TDMA.

Un réseau WirelessHart est constitué essentiellement de 4 éléments : Les entités capteurs ou actionneurs, une entité mobile appelée Handheld responsable de la configuration et du calibrage des autres entités, une passerelle qui connecte les entités du réseau de capteurs aux postes de contrôle et de surveillance, et le Network Manager qui est responsable de la configuration du réseau, de son séquençement et de la gestion des communications entre les différentes entités.

2.2.3.1.9. La norme 6LoWPan

Jusqu'à peu, l'utilisation du protocole IP sur des réseaux sans fil embarqué était considérée comme non viable. En effet, il était très difficile d'adapter le protocole IP pour opérer sur des microcontrôleurs et sur des liaisons à basse consommation d'énergie.

L'émergence du standard 6LoWPAN de l'IETF pour des communications IP sur des liaisons radio à faible puissance a changé la donne.

2.2.3.1.10. WiFi Low Power

WiFi désigne aujourd'hui une solution « Réseau Local Sans Fil » (WLAN) qui a évolué selon différentes versions depuis une vingtaine d'années. Si l'on retient le débit, la portée et la consommation comme paramètres essentiels pour parler des différentes étapes de cette évolution, nous pouvons constater certaines tendances, celles qui nous intéressent le plus ici sont relatives à la consommation.

A l'origine, cette gamme de solutions réseau est née de la norme IEEE 802.11 qui a évolué par amendements ou a été remplacée par de nouvelles versions comme 802.11a, 802.11b, 802.11n... WiFi représente à l'origine une certification d'interopérabilité, avec le temps ce mot désigne plus globalement ce type de réseaux.

2.2.3.1.11. WiDom

Dans les réseaux filaires, les messages peuvent être organisés efficacement en utilisant le bus CAN. Le CAN possède une couche MAC qui permet des transmissions sans collisions et permet d'implémenter une priorité pour l'émission des messages. Ainsi, il est possible, connaissant les caractéristiques du message (période, temps de transmission, gigue...etc.), de calculer le délai maximum d'un message, en l'absence de perte.

Ce protocole de niveau MAC appartient à une famille de protocole appelé protocole à bit dominant. L'émission d'une trame commence par l'émission de son identifiant d'objet. Les collisions sont résolues par un principe de « bit dominant » : si une station émet un '1' pendant qu'une autre émet un '0', c'est le '0' qui est transmis sur le support. La station qui a émis le 1 voit qu'elle n'est pas seule, qu'elle n'est pas la plus prioritaire et cesse d'émettre.

2.2.3.2. *Tri des technologies en adéquation avec les applications*

Nous distinguerons tout d'abord les normes qui spécifient les couches physiques et MAC des réseaux sans fil.

Nous étudierons dans un premier temps les normes spécifiquement conçues pour les réseaux personnels sans fil (WPAN) tels que:

- IEEE 802.15.1
- IEEE 802.15.3
- IEEE 802.15.4.

Nous généraliserons ensuite aux normes pour les réseaux locaux sans fil tels que IEEE 802.11, sans pour autant négliger l'aspect basse consommation en étudiant plus particulièrement WiFi Low Power.

Il existe également des solutions technologiques standardisées promues par des alliances d'industriels. Ces solutions reprennent généralement des standards au niveau des couches basses et proposent leur propre développement au niveau applicatif. La couche réseau est soit standard (ex. IP), soit spécifique.

Bluetooth, soutenu par Bluetooth Special Interest Group, s'appuie sur IEEE 802.15.1 et fournit différents profils applicatifs. Une solution à basse énergie a vu le jour en juillet 2010.

ZigBee, promu par la ZigBee Alliance, s'appuie sur IEEE 802.15.4 et fournit différents profils applicatifs.

ISA 100.a, promu par le comité de standardisation International Society of Automation, s'appuie sur la couche physique du 802.15.4 et utilise IP au niveau réseau. Le marché visé est celui des automates industriels.

Wireless Hart, reconnu comme standard CENELEC, (European Committee for Electrotechnical Standardization), s'appuie lui aussi sur la couche physique du 802.15.4.

Cet état de l'art fait apparaître une tendance forte concernant les réseaux de capteurs sans fil : la couche physique de la norme IEEE 802.15.4 fait référence puisqu'elle est retenue non seulement pour ZigBee mais aussi pour WirelessHart (et dans OCARI notamment). La norme IEEE 802.15.4 offre des services des couches basses (couche 1 et couche 2) du modèle OSI des réseaux avec une taille du logiciel correspondant facilement acceptée par les processeurs associés aux capteurs ou actionneurs. Elle propose des facilités pour économiser l'énergie et ses évolutions annoncées ont été pensées pour offrir une meilleure immunité aux interférences. Ces caractéristiques sont pertinentes car notre but est de mettre en place des réseaux robustes et à faible consommation de capteurs ou actionneurs dans des endroits difficiles d'accès, à faible taux de cycle, dans un environnement obstrué et perturbé, pour des applications aéronautiques et spatiales non critiques.

La norme IEEE 802.15.4 laisse libres les couches supérieures à vocation réseau et application. De là en découlent plusieurs stratégies :

- -1. Voir si la solution ZigBee développée pour des applications assez hétérogènes est bien en adéquation avec les contraintes spécifiques que nous nous sommes imposé.
- -2. Etudier les performances et la pérennité de WirelessHart, solution développée pour des applications plus ciblées contrôle/commande mais qui souffre actuellement de sa rigidité.
- -3. Probablement réfuter la solution ISA100 qui pour l'instant est largement en retrait par rapport aux deux solutions précédemment citées.
- -4. Tenir compte des aménagements annoncés pour retenir ou proposer des aménagements spécifiques pour les couches hautes de la solution (notamment réseau routage économe en énergie).

L'alternative WiFi doit être considérée mais la vocation première de cette solution n'étant ni les réseaux de capteurs ni une économie d'énergie particulièrement optimisée, ce choix est un challenge d'un autre niveau. Notons que Wi-Fi, dans la même bande, va être de plus en plus déployé en cabine des avions pour l'*infotainment* des voyageurs, ce qui peut représenter une source de perturbations supplémentaires qui va à l'encontre de la réactivité de la solution étudiée.

La technologie UWB marque le pas en raison de la complexité de la réalisation des modules de réception. Ceci est confirmé par la désaffection (passagère ?) de fabricants de circuits.

Les applications de ZigBee aux domaines aéronautique et spatial sont essentiellement favorisées par la NASA (avec l'organisation CANEUS) et de l'ESA, qui ont la capacité de financer des programmes à moyen terme, de créer un marché suffisant et de standardiser des modules complets. Les réseaux sans fil ont effectivement plus d'une application dans ces domaines aéronautiques et spatiaux : moindre masse, absence de câblage, possibilité d'insérer des capteurs dans des endroits difficilement accessibles (ISS), surveillance de zones spatiales étendues...

2.2.4. Conclusion partielle sur l'état de l'art

2.2.4.1. Résumé des déductions faites par rapport au retour d'expérience

Retour d'expérience sur les projets aéronautiques liés à l'intégration de réseau de capteur sans fils

| | |
|----------|--|
| WISE | Faire attention à l'architecture de l'aéronef Faire attention à l'avionique |
| SACER | Envisager l'UWB technologie la moins gourmande en énergie |
| SWANS | ZigBee peu énergivore Zigbee est intéressant pour la portée |
| SWAN | Modification de la couche MAC possible pour moduler la consommation énergétique |
| AUTOSENS | Projet complémentaire gérant l'aspect alimentation Des tests ont été réalisés sur des super capacités afin de compléter l'énergie vibratoire récoltée qui pour le moment n'est pas suffisante |
| ASTRAL | 2.4 est un choix pertinent pour la bande de fréquence utilisée pour l'émission |

Retour d'expérience sur les projets non aéronautiques liés à l'intégration de réseaux de capteurs sans fils

| | |
|---|--|
| GTB et domotique | WATTECO a donc choisi la norme IPV6 car elle permet un déploiement à grande échelle grâce à son espace d'adresse étendu |
| Télésanté | La technologie RFID est bien adaptée à des applications dont l'activité n'est pas nécessaire en permanence |
| Suivi des infrastructures et de l'environnement | Pour des applications nécessitant des portées importantes on préférera toujours des fréquences 2.4 type ZigBee ou 802.11 |
| OCARI | OCARI se distingue des piles protocolaires comme <u>ZigBee</u> , WirelessHART et ISA100.11a. |

Retour d'expérience sur les groupes d'étude s'étant penchés sur les problématiques liées à l'intégration de réseaux de capteurs sans fils

| | |
|--|--|
| WAIC | Buts finaux : Trouver la bande de fréquence à utiliser et obtenir une première certification WAIC est un groupe à suivre car largement impliqué dans la décision de l'attribution des bandes de fréquence par l'ITU [ITU] |
| Fly by Wireless (caneus) | les capteurs utilisés tendent à devenir des MEMS (Microelectromechanical systems) ou mieux encore des capteurs intelligents. |
| Low Power Proximity Network of Sensors LPPNS | l'émergence de solutions industrialisées, fiables et à bas coûts |

2.2.4.2. Résumé des informations récoltées grâce à l'étude des technologies existantes et présentation des technologies sélectionnées

Parmi les technologies pertinentes, nous avons identifié les technologies potentielles suivantes, en indiquant pour chacune d'elles les points forts, les points faibles et les points à améliorer.

2.2.4.2.1. Technologies standardisées

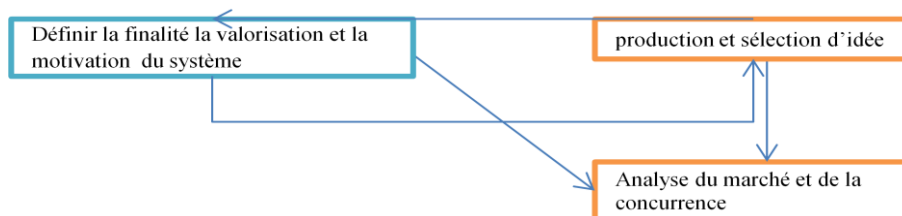
| Technologie | Norme pour couches physique et MAC | Norme pour couche réseau | Norme pour couche application | + Points forts - Points faibles ! Points à améliorer |
|---------------|------------------------------------|--------------------------|-------------------------------|--|
| Bluetooth | IEEE 802.15.1 | IP possible | Profil Bluetooth | +Technologie largement répandue - Consommation importante d'énergie - Nombre de nœuds limités (7 esclaves +1 maître) ! Profil applicatif standardisé à adapter ! Interconnecter les piconets |
| | IEEE 802.15.3 | | | ! Actuellement utilisé pour interconnexion de 2 équipements Wireless USB - UWB : peu de chip disponible |
| ZigBee | IEEE 802.15.4 | IP/6LowPAN possible | Profil ZigBee | + Technologie répandue ! Améliorer l'accès déterministe au médium, ! Améliorer l'efficacité énergétique et routage |
| | IEEE 802.15.4a | variante UWB | | - Pas d'implémentation commerciale |
| WiFi | IEEE 802.11a, b, g | IP/6LowPAN possible | | + Technologie très utilisée dans réseaux MANET - Forte consommation énergétique, ! Protection contre intrusions |
| ISA100 | | IP | | - Pas très répandu |
| Wireless Hart | | | | + Prévu pour résister aux interférences - Solution statique ! Attendre la convergence avec ZigBee |

2.2.4.2.2. Technologie en cours de développement

| Technologie | Norme pour couches physique et MAC | Norme pour couche réseau | Norme pour couche application | + Points forts - Points faibles ! Points à améliorer |
|----------------|------------------------------------|--------------------------|-------------------------------|--|
| WiDom | | | | - Ne s'appuie pas sur un standard - Pas d'implémentation commerciale - Problèmes potentiels avec nœuds cachés, ! Consommation énergétique |
| WiFi Low Power | IEEE 802.11b | IP possible | Se doit d'être optimisé | + Bénéficie de l'assise de WiFi - Propose une version dégradée du 802.11b pour réseaux de capteurs ! Chiffres de consommation énergétique à consolider |

2.3. Analyse de marché

Il convient de faire une analyse du marché et une étude de la concurrence non seulement basée sur l'idée produite et sélectionnée mais aussi orientée par la motivation du système qui en découlera. Il faut noter qu'en fonction de la motivation un système ne sera pas conçu de la même façon.



La matrice conçue par Igor Ansoff classe et explique les différentes stratégies de croissance d'une entreprise. Cette matrice est employée pour un objectif de croissance ou une stratégie de spécialisation. Cet outil, nous a permis de situer SAHARA. Le cadre de ce mémoire n'est pas le lancement d'un produit industriel mais un projet de recherche. Cependant le but final sera la commercialisation et l'implémentation de notre système. A ce titre, et afin de convaincre nos financeurs d'investir dans ce projet, il est utile de visualiser le marché potentiel.

Matrices d'Ansoff

| | | Produit | |
|--------|----------|-----------------------|-----------------|
| | | Existant | Nouveau |
| Marché | Existant | Pénétration du marché | Nouveau produit |
| | Nouveau | Extension du marché | Diversification |

La matrice Ansoff offre 4 choix stratégiques pour atteindre des objectifs de croissance :

Pénétration de marché : L'entreprise essaie de développer ses ventes sur son marché. Les produits existants sont donc vendus aux clients existants. Le produit ne subit aucune modification mais l'entreprise cherche à augmenter ses recettes par des moyens de promotion ou de repositionnement de ses produits. Il faut ici convaincre les clients potentiels et les détourner de produits concurrents.

Extension du marché : L'entreprise essaie d'augmenter ses ventes par l'introduction de ses produits sur de nouveaux marchés. On a donc une gamme de produits existante sur de nouveaux marchés. De nouveau le produit ne subit aucune modification il sera juste vendu à une nouvelle cible (p.ex. par le biais de l'exportation). En fonction des différences culturelles, les produits peuvent subir de légères modifications.

Nouveaux produits : L'entreprise augmente ses ventes en lançant de nouveaux produits (ou des produits modifiés) sur le marché existant. Il y aura plusieurs versions des produits (différents modèles, tailles,...). Les nouveaux produits sont alors vendus à la clientèle existante par le moyen des canaux de distribution existants.

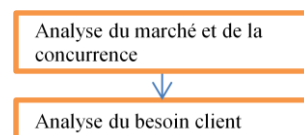
Diversification : Dans ce cas l'entreprise lancera de nouveaux produits et les vendra à une nouvelle clientèle.

Dans notre cas, le produit existe puisque des capteurs filaires sont déjà embarqués à bord d'aéronef et que des modules de communication sans fil sont utilisés tous les jours pour des applications domestiques (hors aérospatial). Cependant, la combinaison de ces deux produits : un capteur communiquant sans fil à bord d'un aéronef n'existe pas. On peut donc voir cette innovation non pas comme une innovation de rupture mais plutôt comme une optimisation donnant naissance à un nouveau produit. Quand au marché, il peut être considéré comme nouveau (club utilisateur comprenant des industriels automobile et aéronautique) même si ce projet répond à un besoin existant dans le domaine aérospatial et que le marché dans ce domaine existera et complétera l'offre du filaire.

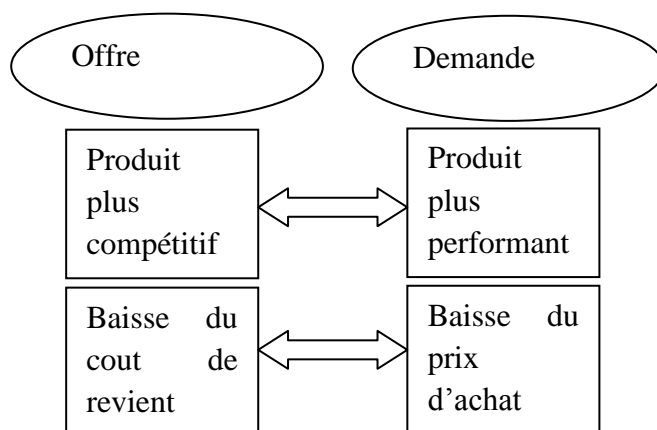
La stratégie à adopter est à cheval sur « nouveau produit » et « diversification ».

2.4. L'analyse d'un besoin

En fonction du marché concurrentiel (s'il existe) on aura (ou non) quelques indices quand à la réaction de la clientèle face au produit et on pourra ainsi mieux définir son besoin. Sinon, on ira sonder celui-ci en prenant soin de bien couvrir le panel de client potentiel.



Besoin générique : Le client souhaite acheter un produit toujours plus performant et toujours moins cher et le vendeur souhaite voir croître son chiffre d'affaire en étant toujours plus compétitif et augmenter ses marges en réduisant ses coûts de revient.



Dans notre cas, nos résultats ne seront pas simples et linéaires mais plutôt matriciels. On aura trois clients potentiels qui nous feront envisager non pas un seul produit mais plutôt une gamme de produit modulaire avec tant que faire se peut : des modules communs répondant à des besoins communs et des modules spécifiques répondant à des besoins spécifiques.

2.4.1. Les besoins avion :

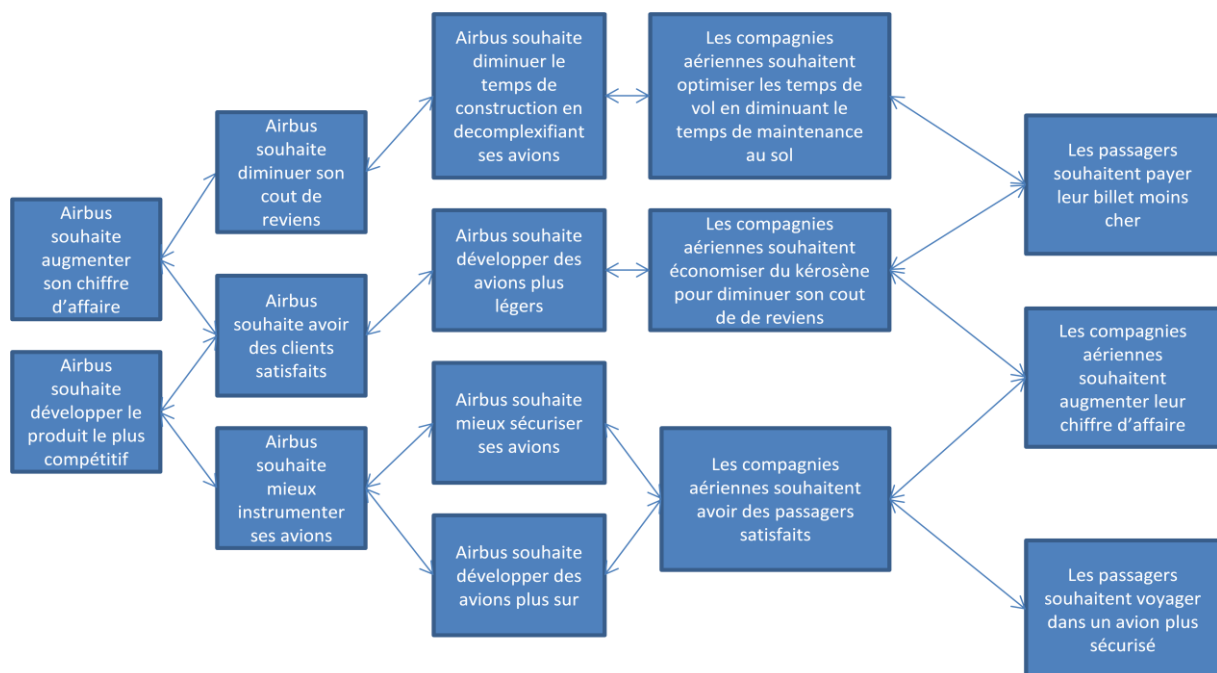
Une préoccupation importante des constructeurs d'avion est de pouvoir vendre un avion plus léger afin d'en réduire la consommation de kérosène. Ceci satisfera de fait les compagnies aériennes qui pourront soit faire profiter de la baisse de leur coût de revient du voyage par kilo embarqué à leurs passagers en baissant le prix du billet soit augmenter leurs bénéfices.

Les constructeurs d'avion souhaitent augmenter leurs chiffre d'affaire en diminuant leurs coûts de revient et pour ce faire réduire le temps de construction en simplifiant leurs produits. Cette simplification de produit induira une simplification de la maintenance pour les compagnies aérienne et donc une réduction du temps passé au sol et une optimisation de l'utilisation des appareils

Les constructeurs d'avion souhaitent produire des appareils plus compétitifs et donc les instrumenter au mieux. Cette instrumentation permettant une amélioration de la sécurité et de la sureté de fonctionnement augmentant ainsi la confiance et la satisfaction des compagnies aériennes et des passagers par ricochet. Multiplier les capteurs pour mieux connaître l'environnement et faire de la mesure en vol est un avantage compétitif considérable.

En résumé :

- Performance et compétitivité (Faire de la mesure en vol et au sol) : évolutivité
- Cout (allègement de l'avion) : réduction du poids
- Simplification du réseau (réduction du temps d'installation) : réduction de la complexité
- Instrumenter des zones difficilement instrumentables : augmentation de la flexibilité
- Apporter un plus sécurité en ajoutant une redondance sans fil (redondance sans fil peu couteuse en poids) : réduction du poids
- Ajouter du contrôle de santé: possible grâce à la réduction du poids et a la flexibilité



Hiérarchie des besoins avions

2.4.2. Les besoins hélicoptère :

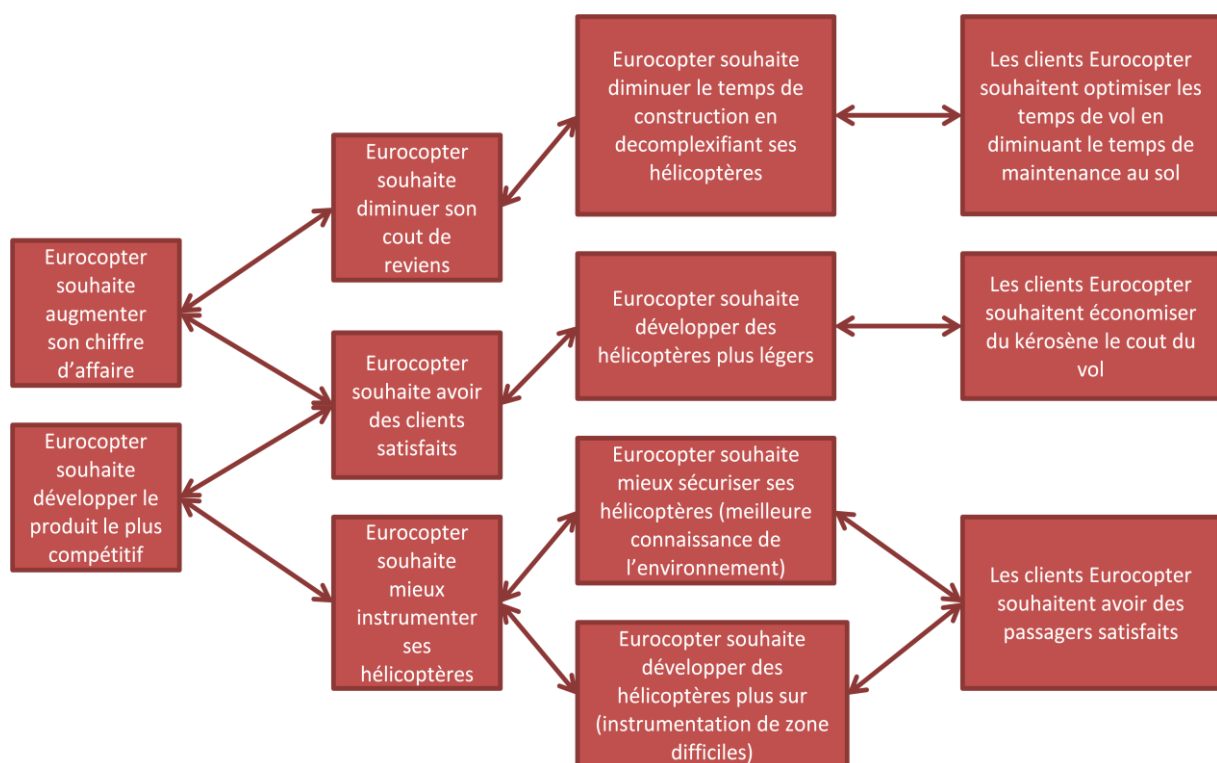
Dans une moindre mesure les constructeurs d'hélicoptère souhaitent alléger leurs appareils. En effet, même si le câblage dans un hélicoptère est moins important que dans un avion, tout allègement est bon à prendre.

En ce qui concerne la connaissance de l'environnement, la navigation est toujours facilitée avec des mesures en vol multipliées.

Quand à la simplification de la construction et la réduction du temps de maintenance du a la simplification du réseau et au contrôle de santé de l'aéronef permis par de nouveau capteur, elle permettrait à Eurocopter d'être plus compétitif

Mais dans le cas présenté, un besoin pressant pour les constructeurs d'hélicoptère réside dans l'instrumentation des zones en mouvement, en effet le givre sur les pales est un véritable problème mais poser des capteurs sur les pales d'un hélicoptère était jusqu'alors inenvisageable.

- Performance et compétitivité (Faire de la mesure en vol et au sol) : évolutivité
- Instrumenter des zones en mouvement : augmentation de la flexibilité
- Cout (allègement de l'hélicoptère) : réduction du poids (secondaire)
- Simplification du réseau (réduction du temps d'installation) : réduction de la complexité (secondaire et moins complexe que l'avion)



Hiérarchie des besoins hélicoptères

(On ne développe pas l'aspect passager autant que pour les besoins avion car les trajets sont plus courts, les passagers moins nombreux et le confort n'est pas la priorité)

2.4.3. Lanceur:

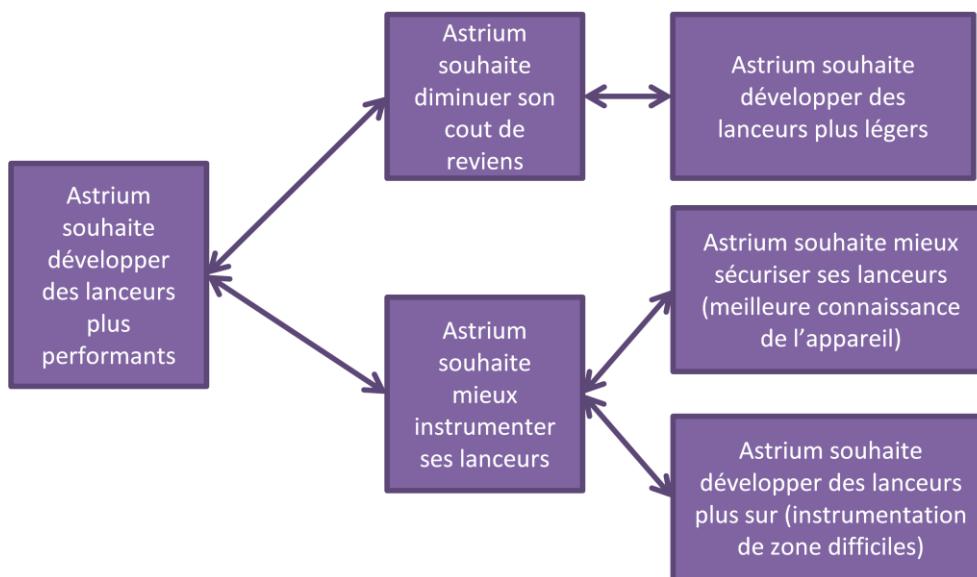
Le besoin lanceur se différencie en plusieurs points.

Les mesures souhaitées doivent être réalisées au sol et non pas au sol et en vol comme dans nos deux autres cas. Aussi, l'aspect sécurité est moins important.

En ce qui concerne l'allègement, certains réseaux de capteur, même s'ils ne serviront plus une fois le lanceur en vol, ne seront pas retirés de l'appareil (surtout ceux qui auront été posés dans des zones difficilement instrumentables) donc l'allègement est (même si pas primordial) un point parfois important (1kg envoyé coûte 10 000euro)

Le plus important pour les constructeurs est de pouvoir réaliser des séries de mesures partout dans le lanceur. Ceci entraînera les mêmes problématiques de compatibilité électromagnétique que dans un avion ou un hélicoptère, et posera le problème de la consommation énergétique qui est un problème à part entière et qui volontairement ne sera pas traité

- Performance (Faire de la mesure au sol) : évolutivité et malléabilité
- Ajouter du contrôle de santé : flexibilité
- Coût : la réduction du poids pour les mesures au sol est secondaire (sauf pour les réseaux non retirés au lancement)



Hiérarchie des besoins lanceurs

2.4.4. Conclusion sur les besoins :

Certaines commonalités entre ces besoins apparaissent, on pourrait alors envisager de créer une famille de système modulaire avec des modules commun pour satisfaire les besoins commun et des modules spécifiques pour satisfaire les besoins spécifiques. Cependant, on peut d'ores et déjà dire que les besoins lanceur se démarquent un peu des autres besoins (pourront-ils vraiment être satisfait la famille de système ?) et que les besoins les plus difficiles en apparences à satisfaire sont les besoins avion.

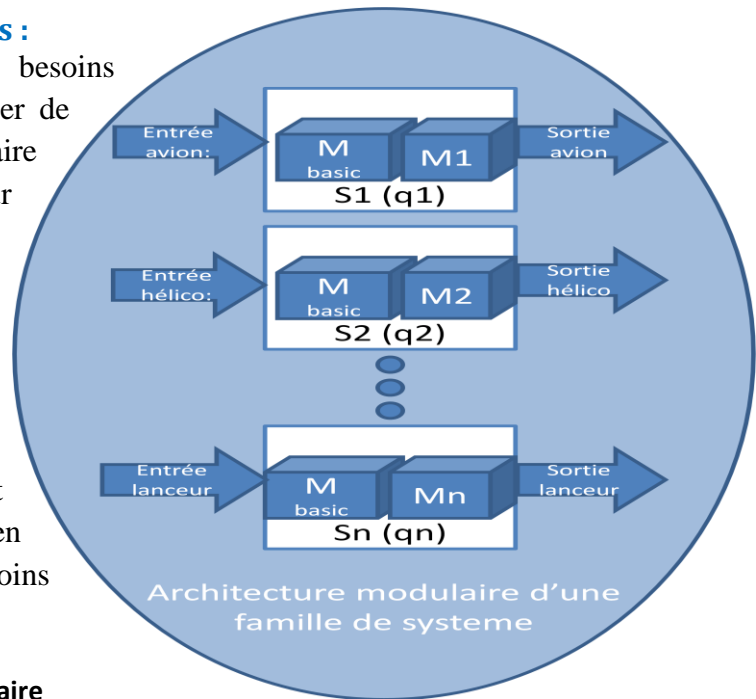
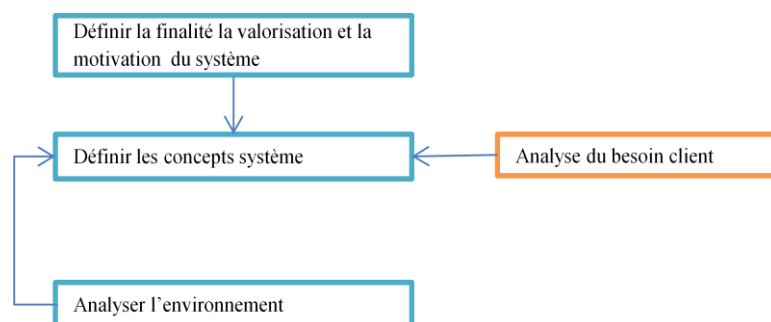


Figure 1 : architecture modulaire

2.5. La définition d'un concept système :

Définition du concept système : un système est un ensemble composite de personnels de matériel et de logiciels organisés pour que leur interfonctionnement permette dans un environnement donné de remplir les missions pour lesquelles il a été conçu. [Meinadier01]

Un système est caractérisé par une fonction de transfert F modélisant son comportement en fonction du temps. Le système reçoit donc à un instant t une fonction $X(t)$ et produit une fonction $Y(t)$ dépendant de la valeur de $Q(t)$ état interne du système, régit par un ensemble de lois pouvant évoluer au cours du temps. Pour définir la fonction interne du système on aura besoin de connaître l'orientation des motivations qui nous ont amené à créer ce système mais aussi les besoins de nos clients et pour connaître les entrées et les sorties on fera une analyse de l'environnement de notre système (voir 2.7).



Notre système, comme le projet sur lequel cette thèse est basée, s'appellera SAHARA (Solution pour l'ArcHitecture et les Application des Réseaux sans fils dans les Aéronefs). Sa fonction sera de transmettre et de traiter les données émises par tout type de capteurs.

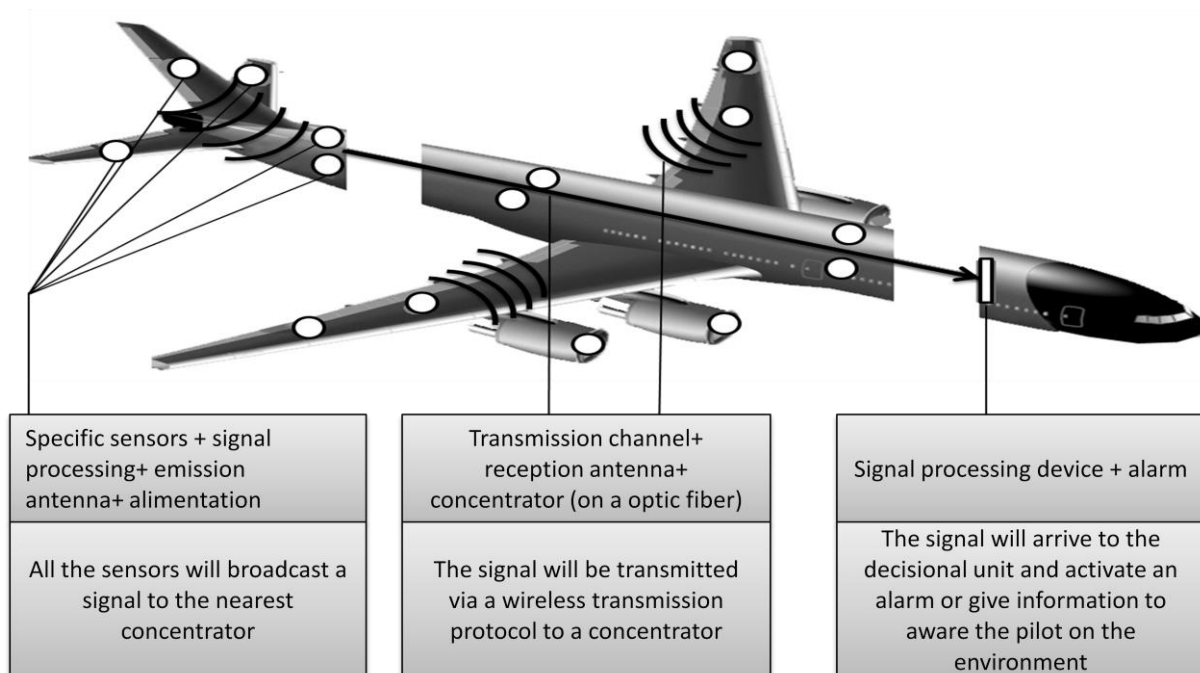


Figure 2 : concept système : vue d'ensemble

Rappelons que la fonction interne F du système modélise son comportement en fonction du temps et dépend de son état interne. En d'autre terme elle modélise la transformation que fait subir le système à l'entrée X et dont le résultat sera la sortie Y

On peut discerner trois types de transformations.

Les transformations dans le temps, dans la forme, et dans l'espace. On obtient alors si on croise ces trois transformations avec les trois flux la matrice MEI TEF [Meinadier]

| | Flux physique | | Flux informationnel |
|--------|----------------|----------------|---------------------|
| | Matière | Energie | Information |
| Temps | stockage | accumulation | mémorisation |
| Espace | transport | transport | communication |
| Formes | transformation | transformation | traitement |

En termes de transformation, le système SAHARA, transforme une information. On peut en déduire que notre système combinera une fonction de communication avec une fonction de traitement et optionnellement selon l'application envisagée, une fonction mémorisation.

Entrée/ Sortie : On peut considérer pour plus de facilité les entrées comme des flux. Les flux entrants et les sortants d'un système qui rappelle le, sont souvent respectivement des flux sortants et entrants de systèmes environnants peuvent être de trois types : matières, énergies et informations pour plus de facilité on considérera la matière et l'énergie comme des flux physiques qui ont des propriétés strictes de conservation lors des transformations, contrairement aux flux informationnels qui peuvent être diffusée mais conservée (non-consommabilité) [Meinadier]

Fonction interne : On peut définir quatre types de système en fonction des flux qui sont à traiter

| Flux entrant | | Flux sortant | |
|--------------|----------------|--|-------------------------------------|
| | | Physique | Informationnel |
| | Physique | Système de transformation physique | Système d'observation capteur |
| | Informationnel | Système d'action effecteur, actionneur | Système de traitement d'information |

Voici précisément comment se positionne le système SAHARA dans la chaîne de système.

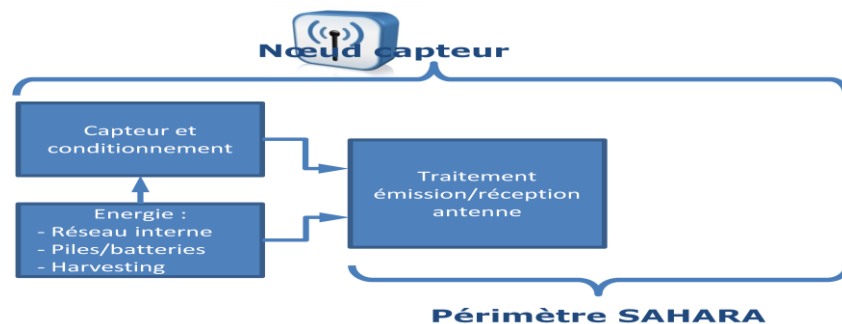


Figure 3: concept système, entrée du système

Il aura pour sortie des informations traitées et acheminées jusqu'au bus aéronef le plus proche (le bus aéronef étant l'interface la mieux adaptée pour se raccorder au réseau déjà existant)

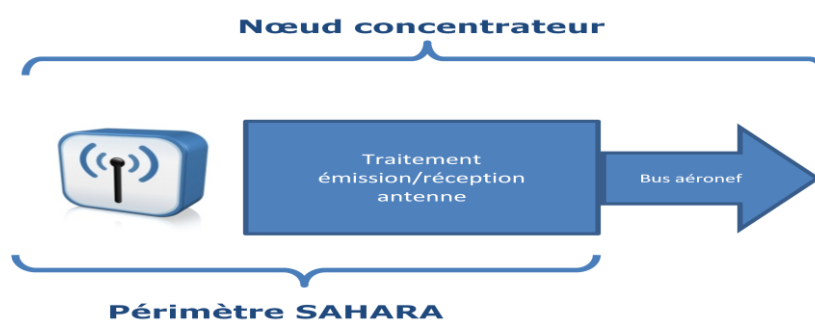


Figure 4 : concept système, sortie du système

Un capteur aura pour flux entrant des phénomènes physiques et pour sortie un ensemble de données (donc un flux informationnel). On constate en effet que le système qui se trouve en entrée de SAHARA est un système d'observation (capteur). En sortie de SAHARA, on obtient des informations sur l'environnement, donc aussi un flux informationnel, prêt à être acheminée par le bus de transfert de donnée le plus proche. Notons que le bus de données est un bus informatique dédié au transfert des données au sein de l'aéronef. Comme on pouvait le prévoir avec le tableau ci-dessus, SAHARA est bien un système de traitement d'information.

2.6. Etude du potentiel

A l'aide de l'analyse des besoins client, on ciblera le public visé et avec l'état de l'art on aura déjà une idée de l'effort d'innovation à réaliser. En fonction de ces deux éléments on fera une étude du potentiel du système. On définira le marché à couvrir et on pourra mettre un premier jalon go no go



On chiffrera le nombre de clients que l'on classera par catégories. On sélectionnera un certain nombre de brique technologique et on quantifiera l'effort d'innovation. On déterminera ce que l'on peut faire avec ce que l'on a et si cela vaut la peine.

2.6.1. Marché aéronautique et spatial et retombées à cinq ans

A l'horizon de cinq ans, les capteurs sans fils pourront prendre place à l'intérieur des avions, des hélicoptères et des lanceurs et seront en mesure d'attaquer le marché mondial.

La production annuelle mondiale et le nombre total de capteurs par type d'aéronef sont résumés ci-après :

| | Production ou lancement annuelle (environ) | Nombre de capteurs par aéronef (environ) |
|-------------------|---|--|
| Avions de ligne | 1000 (Airbus : 500) | 2000 |
| Avions d'affaires | 1000 (Dassault : 80) | 1500 |
| Hélicoptères | 1000 (Eurocopter : 500) | 1500 |
| Lanceurs | Ariane 5 : 7 et Soyuz : 1 (en 2010 mais en constante évolution) | 500 |

En prenant l'hypothèse du remplacement de seulement 10 % des capteurs embarqués par des versions sans fil, on aboutit à un besoin de plus de 500 000 capteurs sans fil par an. En comptant un prix d'une centaine d'euros par capteur, cela fait un chiffre d'affaires de 500 M€ par an.

2.6.2. Autres marchés

L'utilisation de réseaux de capteurs sans fil intéresse au plus haut point les secteurs de l'automobile, du ferroviaire, de la défense et de l'industrie en général. Le secteur automobile à lui seul, avec plus de 60 000 000 de véhicules vendus chaque année de par le monde, est à même de générer un besoin de plus d'un milliard de capteurs sans fil par an. Avec un prix d'environ 20 € par électronique associée, ceci représente un chiffre d'affaires de 20 milliards d'euros par an.

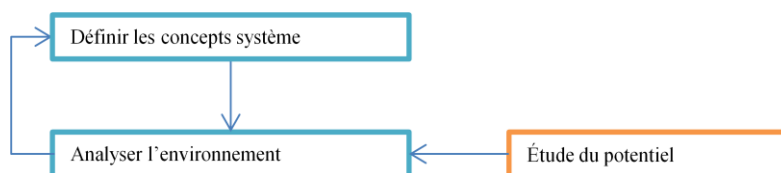
2.6.3. Club utilisateurs

Pour préparer la diffusion du produit SAHARA à d'autres domaines que l'aéronautique et l'espace, le projet SAHARA sur lequel est basé cette thèse a fait entrer dans un « club utilisateurs » des entreprises (hors aéronautique) intéressées par nos résultats.

Notre club utilisateurs regroupe d'ores et déjà Dassault Aviation, Renault et Michelin. Thales Alenia Space, PSA et Zodiac.

2.7. Analyse de l'environnement

L'analyse de l'environnement est une étape très importante. Il est nécessaire de la faire débiter le plus tôt possible, dès que les fonctions internes du concept système sont établies (voir analyse MEI TEF dans la définition du concept SAHARA en 2.5). L'environnement du système est composé de l'ensemble des systèmes en entrée ou en sortie de notre système cible. On trouve des catégories récurrentes de système environnant dont les systèmes « client » défini dans l'étude du potentiel font partis



On établira ici une cartographie des systèmes environnants

2.7.1. Systèmes environnants définition :

On appellera élément environnant (se) de notre système cible (sc) (le produit à concevoir) tous systèmes interagissant avec ce système cible. [Meinadier01]

La sortie d'un système environnant au sens large peut être une entrée du système cible et une sortie du système cible peut être l'entrée d'un système environnant.

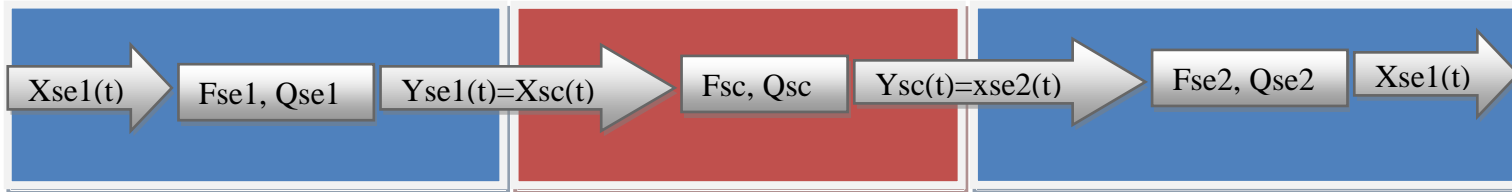
Si l'on reprend l'équation du système cible : [Aiguier]

$$\begin{aligned}
 Y_{sc}(t) &= F_{sc}(X_{sc}(t); Q_{sc}(t); t) \text{ ou,} \\
 Q_{sc}(t) &= \Delta(Q_{sc}(t); X_{sc}(t); t) \\
 Y_{se}(t) &= F_{se}(X_{se}(t); Q_{se}(t); t) \\
 Q_{se}(t) &= \Delta(Q_{se}(t); X_{se}(t); t)
 \end{aligned}$$

On aurait $Y_{sc}(t) = X_{se}(t)$

| | |
|------|----------------------------|
| X(t) | Entrée à l'instant t |
| Y(t) | Sortie à l'instant t |
| Q(t) | Etat interne à l'instant t |
| F(t) | Fonction de transfert |

Et $Y_{se}(t) = X_{sc}(t)$



Le problème souvent rencontré lorsqu'on essaie de faire l'inventaire des systèmes environnants le système cible, on se rend compte qu'indirectement le monde entier environne le système cible. La difficulté de cet exercice réside donc dans la définition du degré de proximité que l'on considérera pertinent. On peut cependant d'ores et déjà, pour faciliter cette tâche, se référer à certaines catégories de système environnant à considérer de façon assez récurrente lors du processus d'innovation [PESTEL]:

- Le système politique : il englobe l'ensemble des systèmes politiques qui pourraient influencer sur le système cible. On aura donc plusieurs niveaux concentrique de système politique, allant de la politique de l'entreprise, en passant par la politique régionale, la politique étatique, la politique des autres pays ou le système cible pourrait être exporté, jusqu'à la politique mondiale.
- Le système économique : conditionné par le marché existant et le marché potentiel
- Le système sociétal : l'entreprise, sa culture, sa gestion du changement.
- Le système technologique : l'ensemble des technologies disponibles, matures et qui pourraient être implémentées sur le système cible.
- Le système environnemental : l'ensemble des éléments physiques environnant le système (les autres systèmes embarqués avec le système cible, les conditions climatiques dans lequel le système cible évolue)
- Le système législatif et réglementaire : l'ensemble des normes que le système cible doit respecter.

2.7.2. Acteurs types

Une fois l'environnement défini il est primordial d'identifier les principaux acteurs. Pour ne pas en oublier, Il est apparu pertinent de croiser les systèmes environnants avec chaque étape de la vie d'un produit afin de souligner tous les acteurs susceptibles d'intervenir sur SAHARA. Voici donc une matrice croisée entre les systèmes environnants génériques de l'analyse PESTEL et le cycle de vie générique d'un système décrit dans le chapitre 2 systems engineering processes and life cycles de « systems engineering » d'Andrew Sage [Sage03].

| | Conceptualisation | Développement | Utilisation | Retrait de service |
|--|---|---|---|--|
| Le système politique | Direction du service recherche et développement | Responsable de la conduite du changement | Système de Maintenance | Responsable en charge du plan de retrait |
| Le système économique | Direction financière | Direction marketing | Client | Direction financière (cout du retrait et du recyclage) |
| Le système sociétal | Ingénieur de conception | Producteur et industriel | Operateur Utilisateur final (pilote et équipes de maintenance) | Ingénieur de conception (remplacement du produit par un autre plus innovant) |
| Le système technologique | Technologie utile existante | Technologie aboutie | Technologie mature et robuste | Technologie compatible avec les technologies futures |
| Le système environnemental | L'environnement physique en contact direct avec le système (avionique et structure de l'aéronef) | L'environnement physique en contact direct avec le système (avionique et structure de l'aéronef) | Respect de l'environnement (limitation de la pollution) | Ecologie, recyclage |
| Le système législatif et réglementaire | Norme de conception | Norme de production | Norme d'utilisation | Norme de retrait |

Matrice croisée entre systèmes environnants et étapes de vie du système : acteurs intervenant sur le système au cours du temps

Maintenant qu'on a spécifié les grands ensembles impactant le système. Il sera utile d'être plus restrictifs car pour définir les exigences, on gardera en mémoire tous les acteurs mais on n'interrogera que les parties prenantes donneuses d'ordre. Rappelons que nous nous trouvons dans le cadre d'un projet de recherche et que tous les acteurs cités ci-dessus ne sont pas forcément pertinent vu le niveau d'avancement du produit. On s'intéressera donc aux phases de conceptualisation de développement et d'utilisation et dans ces phases, seuls les acteurs notés en gras nous intéressent. Le système politique n'impactera pas notre système dans l'immédiat. On peut regrouper ces acteurs en cinq grands groupes :

- Le système économique ou seul le client nous intéresse qu'on regroupera avec les utilisateurs finaux du système sociétal et qu'on intitulera système client (utilisateur, opérateur),
- Le système environnemental direct (avionique et structure de l'aéronef) et indirect environnement physique de l'aéronef
- Le système législatif et réglementaire ou l'ensemble des normes dans les phases qui nous intéressent seront considérées
- Le système sociétal ou apparaissent les ingénieurs de conception, les producteurs et les industriels
- Le système technologique

Ces parties prenantes si elles ne sont pas considérées pourraient dès le départ mettre en péril le système.

2.7.2.1. Environnement indirect

L'environnement indirect est l'environnement de l'avion, de l'hélicoptère ou du lanceur. Il peut être décomposé comme suit :

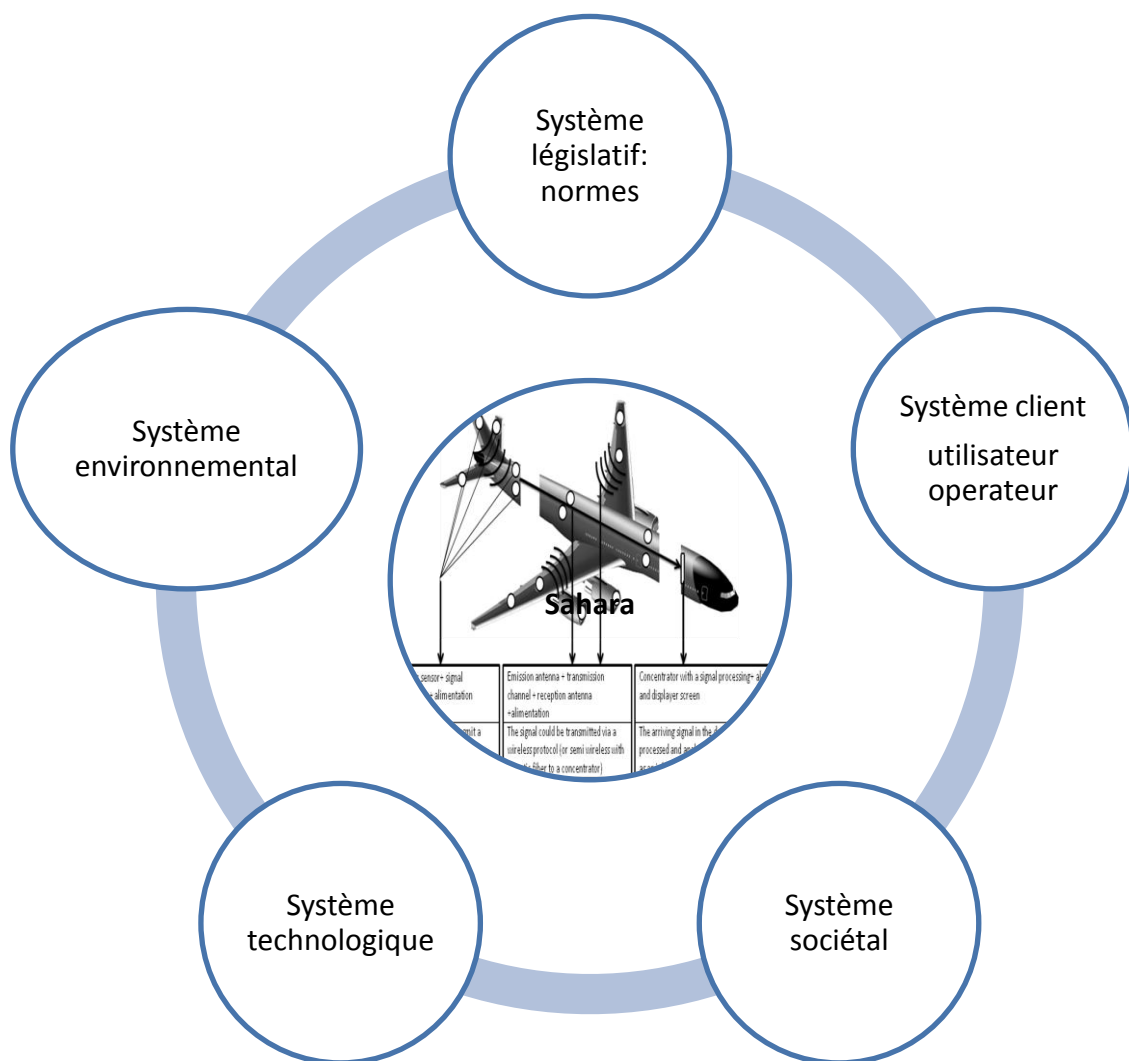


Figure 5 : système environnementaux indirect

2.7.2.1.1. Système environnemental :

Ce système est composé de l'ensemble des conditions physiques et climatiques dans lesquelles l'aéronef évolue: il comprend les éléments naturels qui pourraient impacter sur SAHARA (foudre pluie, neige, froid, EMI, vibration) ainsi que de tous les systèmes extérieurs à l'aéronef qui pourraient interférer (onde électromagnétique émises par tout type de système)

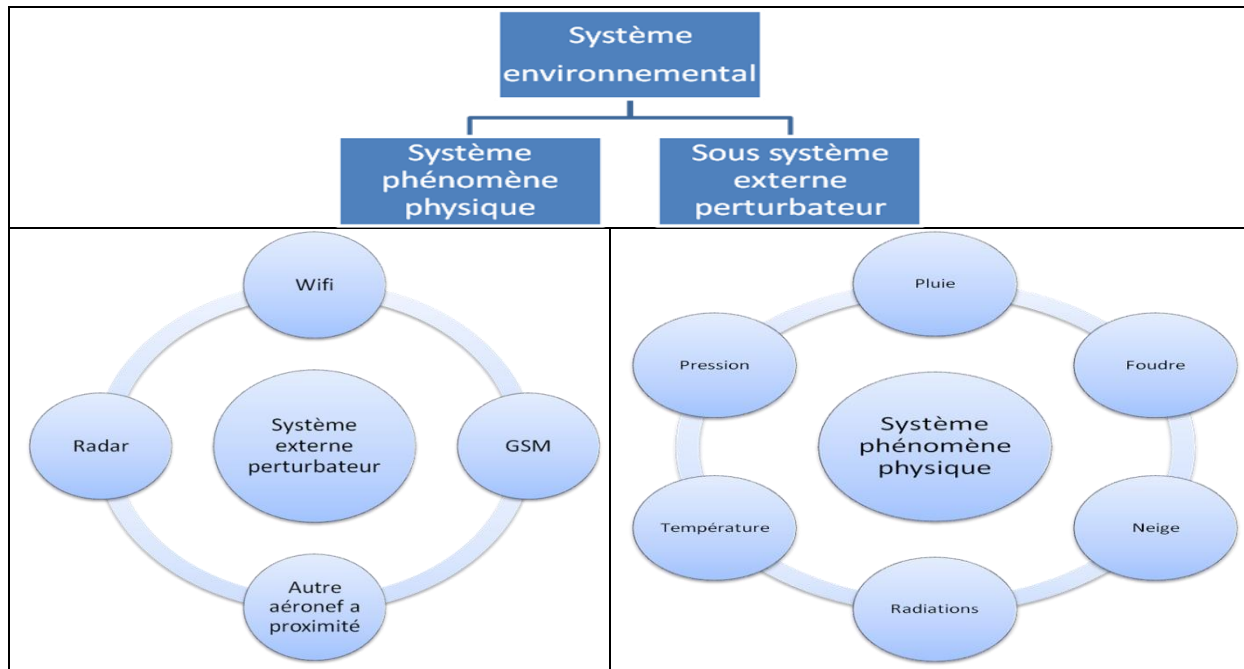


Figure 6 : Système environnemental au sens de l'environnement de l'aéronef

2.7.2.1.2. Système normatif (législation) :

Il inclue les normes sanitaires, la législation inhérente à la régulation des bandes de fréquences ITU et les normes aéronautique [ITU], [DO-160], [DO-178]

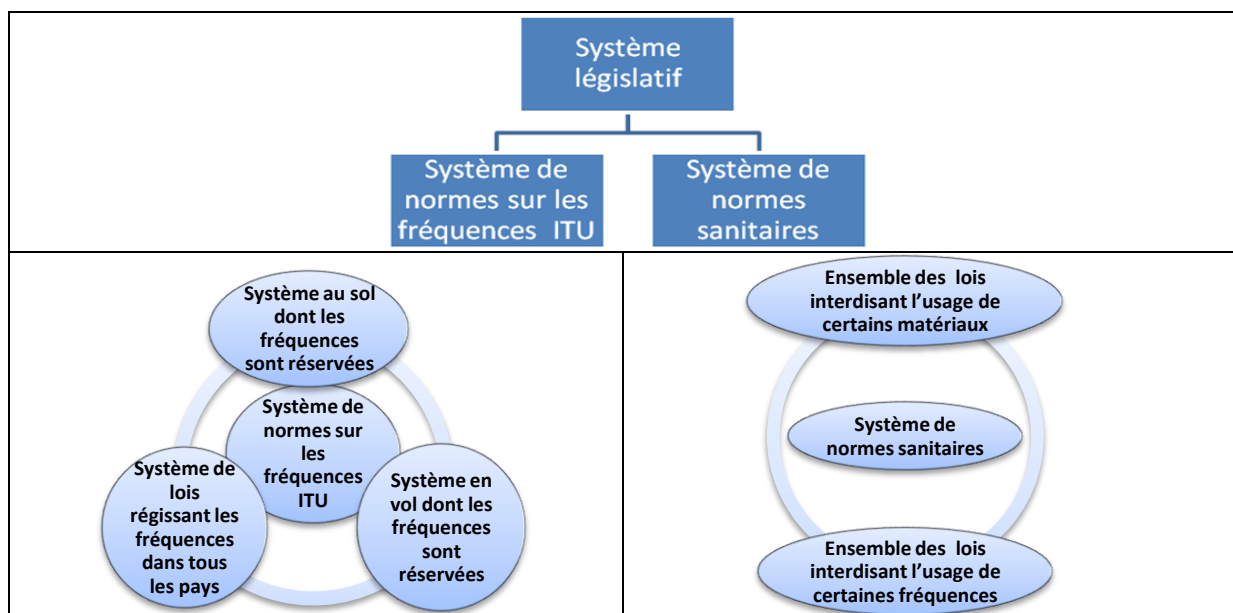


Figure 7 : système législatif

2.7.2.1.3. Le système sociétal ingénierie:

Ce système inclut tous les acteurs en charge de la conception de la réalisation et de la production du système SAHARA

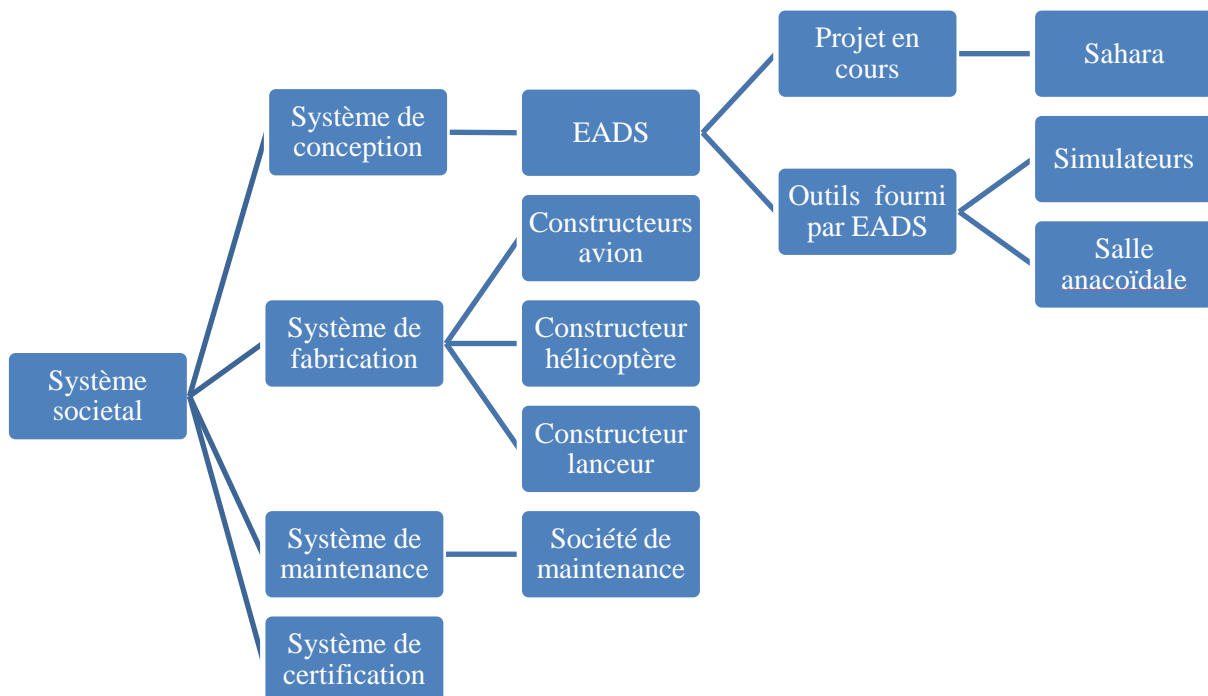


Figure 8: système d'ingénierie

2.7.2.1.4. Système technologique :

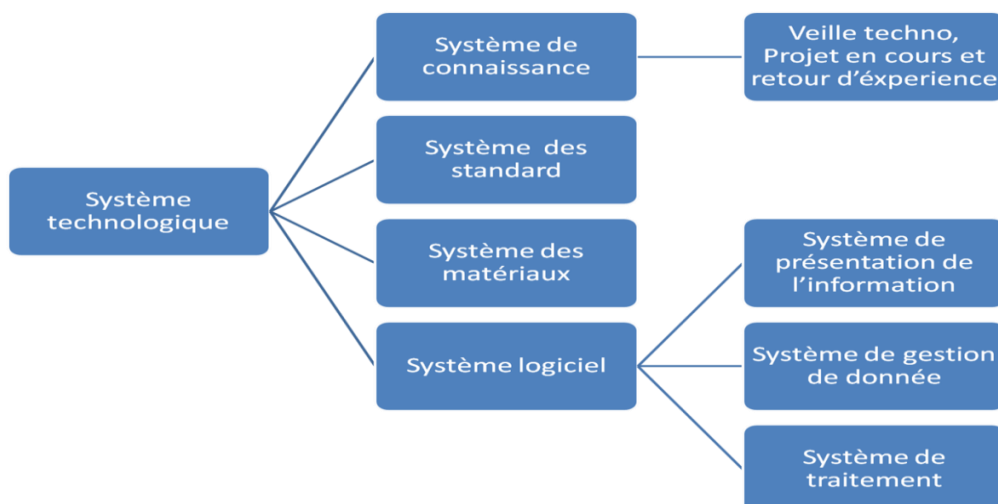


Figure 9 : système technologique

2.7.2.1.5. Clients, operateur, utilisateur:

Les clients sont de plusieurs types ils ont un niveau de proximité de différente envergure avec le système. Le client est celui qui tire profit du produit et bénéficie des services qu'il peut fournir.

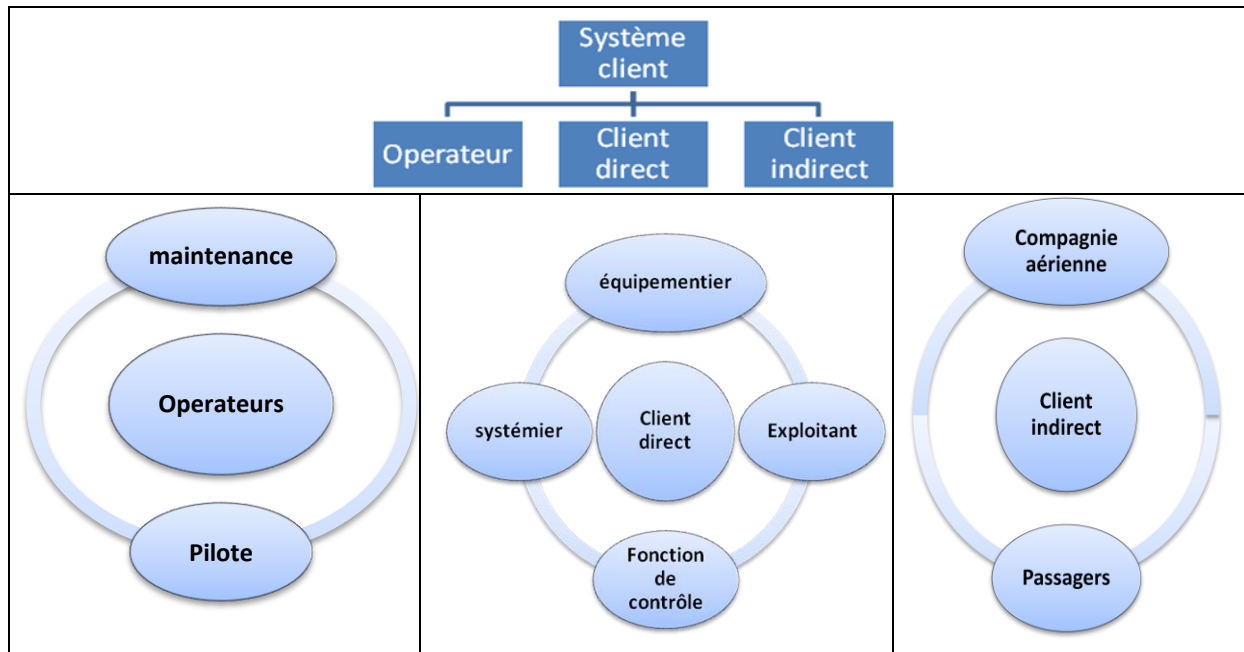


Figure 10 : système clients

Pour les avions, les systémiers, les équipementiers et les exploitants profiteront d'un produit plus léger et dont la maintenance sera améliorée par l'accroissement des points de surveillance offert par cette nouvelle technologie.

Dans un hélicoptère et sur un plan fonctionnel, les principaux clients sont les fonctions intégrant des capteurs installées en partie tournantes, on citera notamment les pales et les éléments de transmission.

Une autre fonction cliente est le contrôle de la santé de la machine, dont la vocation est d'installer de plus en plus de capteurs, notamment dans les zones les plus confinées. Sur un plan intégration, les principaux clients seront les équipements avioniques d'un système.

2.7.2.2. Environnement direct

Pour notre système cible sera donc composé essentiellement des différents systèmes embarqués à bord des aéronefs. Chaque catégorie de système influe de près ou de loin sur SAHARA et représente donc des contraintes potentielles qui donneront lieu à une série d'exigence (problématique CEM, température extrême à l'approche des moteurs) qui découle d'une exigence primordiale : Le système ne doit pas perturber ni être perturbé par les systèmes environnants

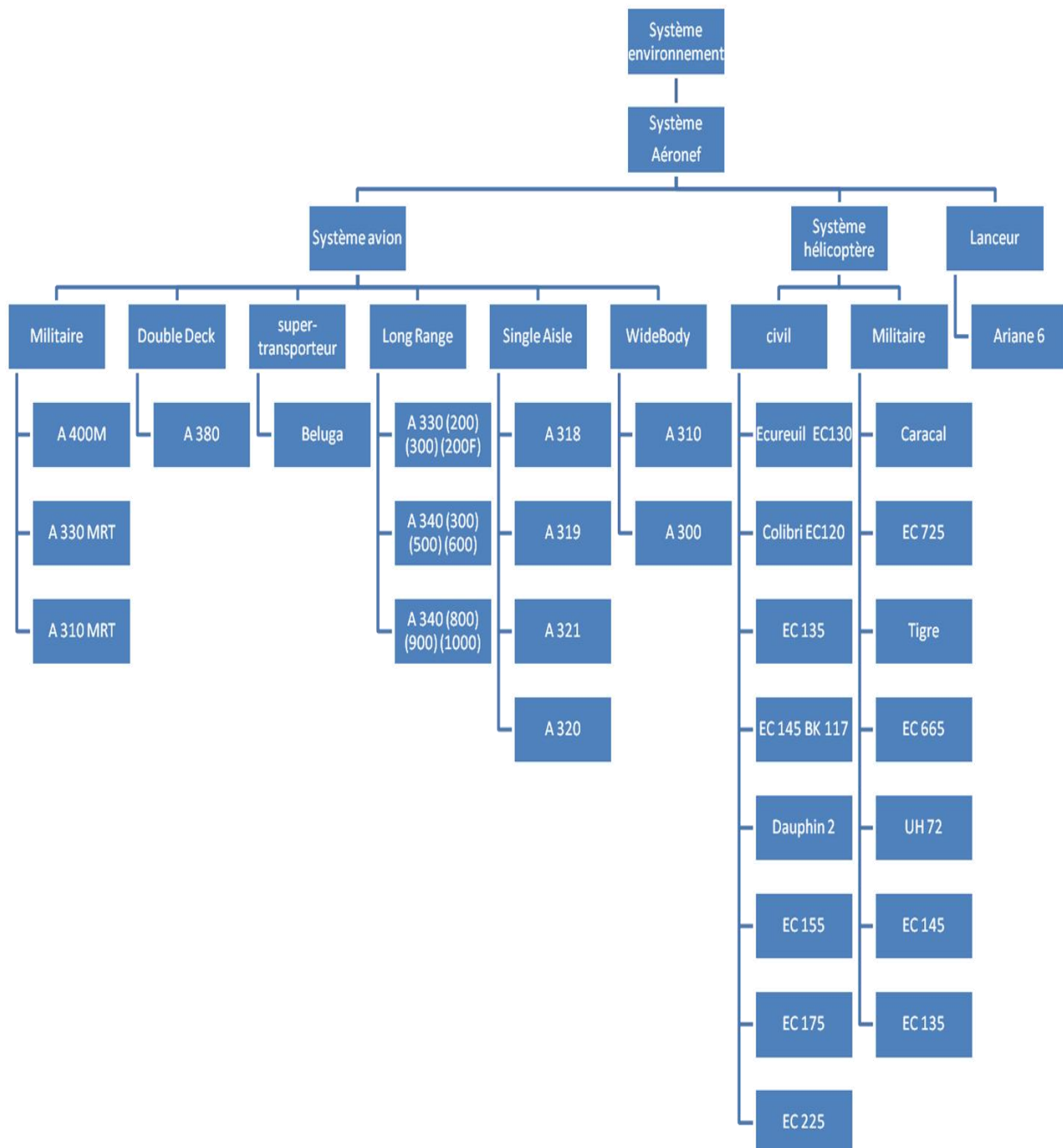


Figure 11 : environnement direct du système SAHARA

On peut décomposer les aéronefs en plusieurs catégories de système

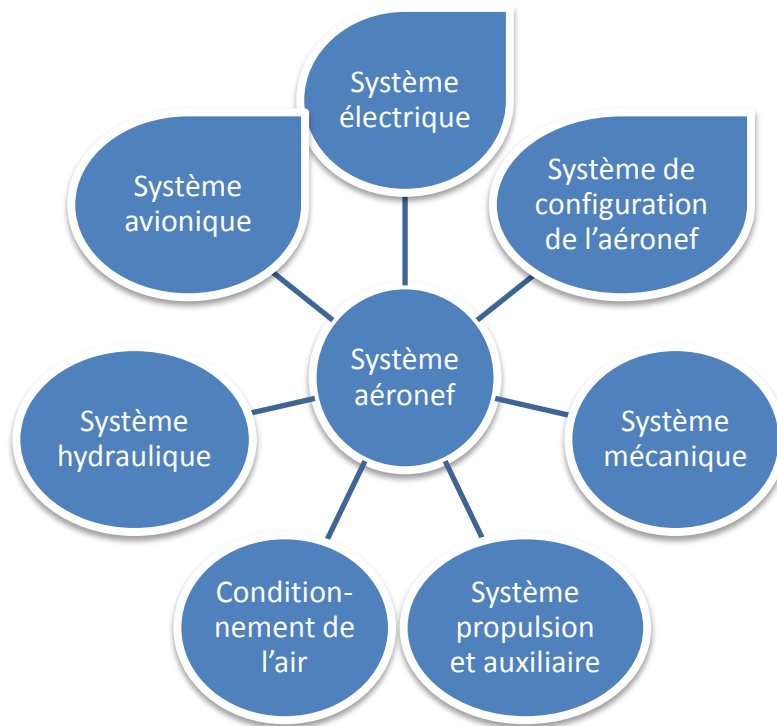


Figure 12 : détail des sous systèmes aéronef

Détail des systèmes impactant sur SAHARA selon les normes ATA 100

- Système avionique
- Système électrique
- Système configuration de l'aéronef

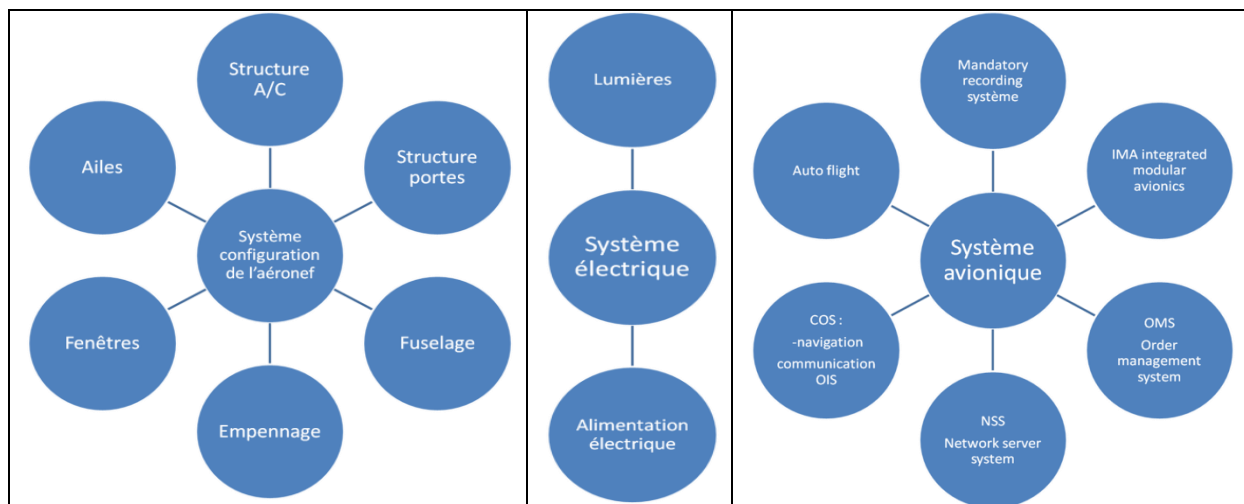


Figure 13 : détail des systèmes environnementaux directs influents

2.7.2.3. SAHARA : « un système dans un système »

Le système SAHARA est soumis à un environnement direct qui est l'aéronef à bord duquel il est embarqué et à un environnement indirect qui est celui de l'aéronef lui-même. [Sage02]



Figure 14 : SAHARA, un système dans un système soumis a un environnement direct et indirect

3. Approche opérationnelle en phase projet de conception d'un système innovant

Le montage effectué en phase amont du projet permet d'entraîner sa sélection. C'est le premier jalon go no go du processus. Le concept a été jugé innovant profitable et utile reste maintenant à commencer la démarche systémique dont la chronologie est rappelée dans la figure ci-dessous. Ce qui sépare la phase amont de la phase projet c'est le moment où le projet est jugé suffisamment prometteur pour commencer d'être financé. A partir de ce point, un planning est établie et une feuille de route est validée avec des jalons et des livrables pour pouvoir suivre les avancées.

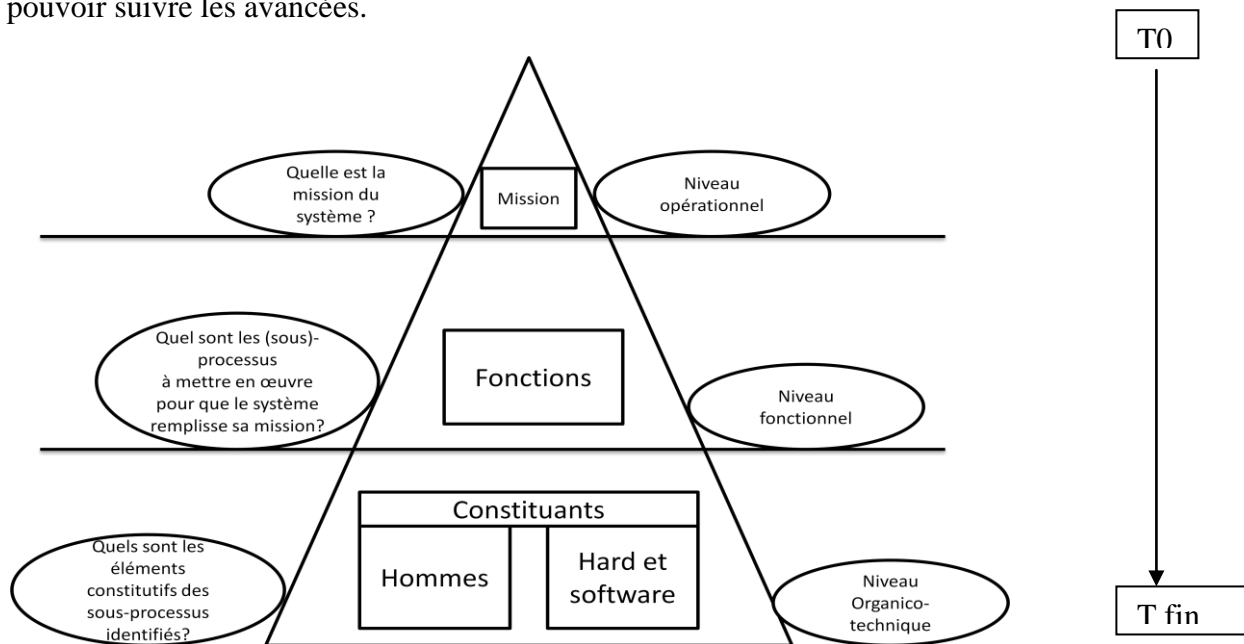
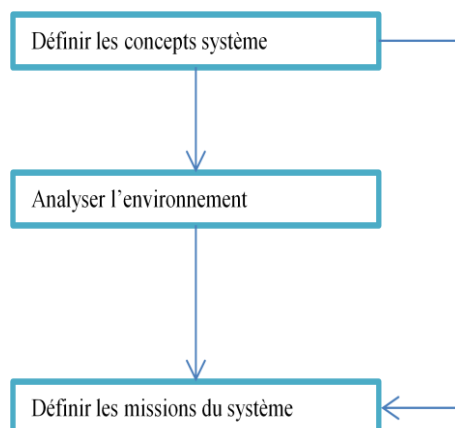


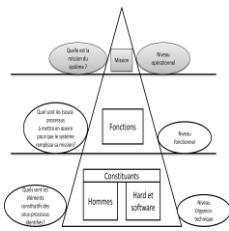
Figure 15 : démarche systémique de la conception d'un système

3.1. Définition du système

Définition des missions du système : Les missions sont les charges confiées aux systèmes par les clients identifiés dans l'analyse de l'environnement. Ces charges sont la traduction de la fonction interne des systèmes définis dans le concept système. On établira une hiérarchisation des missions.



3.1.1. Des missions accomplies par un concept



Tout système a une série de missions. Une mission de système doit pouvoir s'exprimer en une seule phrase simple compréhensible et partagée par tous. Incarnée par un sponsor légitime, sa réussite doit être mesurée par un nombre très limité d'indicateurs de performance. Comme on l'a souligné dans le § 2.5, le système SAHARA est un système dont les flux entrant et sortant sont informationnels.

En effet, SAHARA a pour entrée des capteurs qui transmettent des informations sur l'environnement intérieur (capteur de température dans les moteurs ou dans la cabine) et extérieur (capteur de pression extérieure, capteur de fissure, distorsion des matériaux composites constitutifs du fuselage) de l'aéronef. SAHARA aura pour sortie un bus interne, (comme mentionné en figure 3 du § 2.5), relié au centre de décision adéquat (cabine de pilotage, appareillage de maintenance, logiciel de prise de décision, alarmes). Toujours d'après les tableaux dans le § 2.5 on déduit que SAHARA devra communiquer dans l'espace de l'aéronef envisagé, mémoriser un certain nombre de données dans le temps et apporter une valeur ajoutée aux données en les traitant. Grossièrement au niveau opérationnel le système SAHARA se résume comme suit :

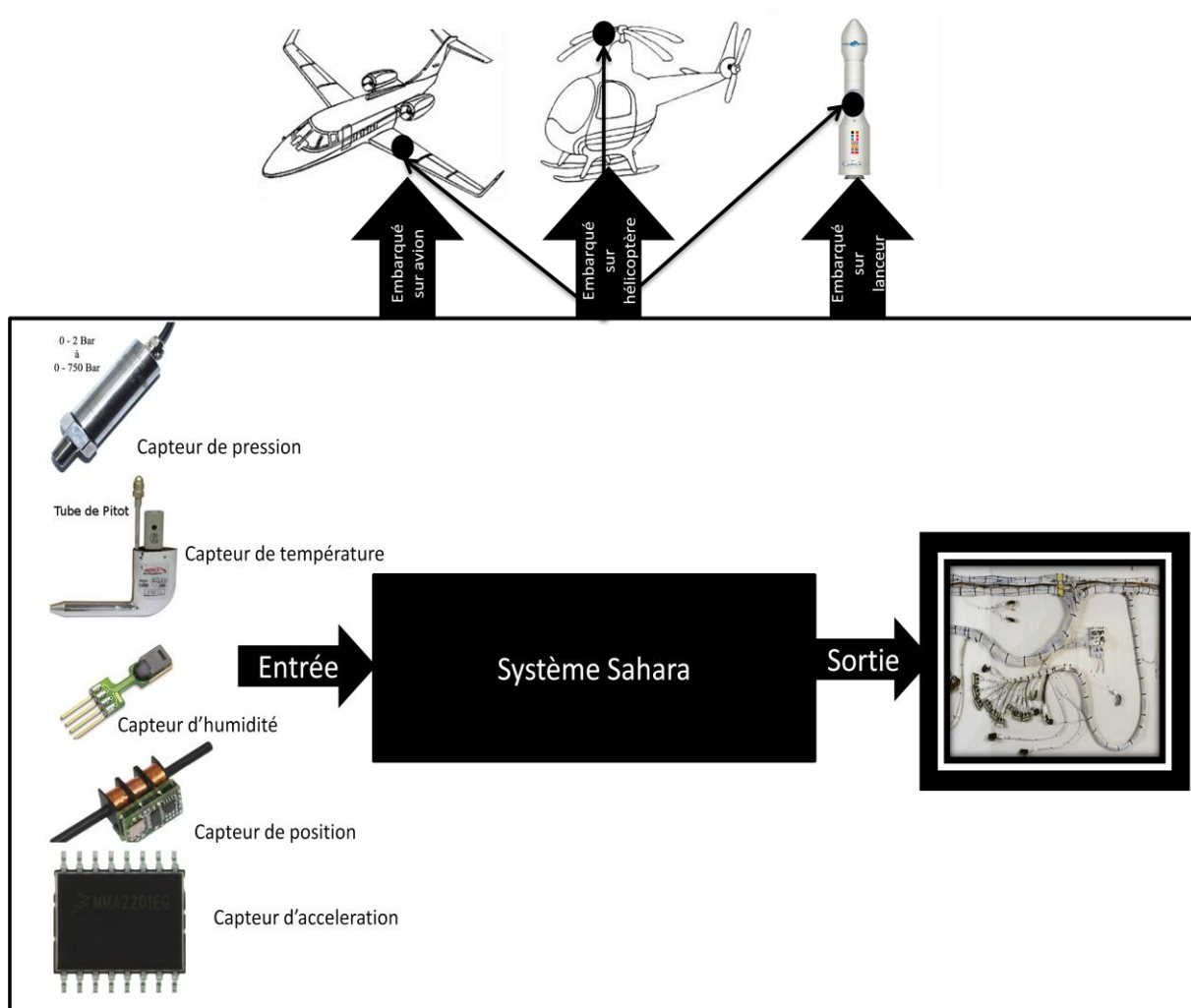


Figure 16 : les entrées et sorties du système SAHARA

Dans le cas de SAHARA, les missions de notre système sont de traiter et transmettre un message entre un émetteur et un récepteur. Dans un contexte opérationnel, l'émetteur est lié à un capteur et le récepteur est lié à un centre décisionnaire. Dans un contexte stratégique rappelons que le système dans son intégralité est embarqué à bord d'un aéronef. On se trouve dans le cadre d'un système embarqué sur un système plus grand

3.1.2. Une vision opérationnelle

Le but de l'architecture opérationnelle est de comprendre l'ensemble des interactions prévisionnelles (en termes de contexte, de nature et de dynamique) entre un système et son environnement. [Krob03]

L'architecture opérationnelle permet :

- de garantir un niveau d'exhaustivité raisonnable dans l'identification des parties prenantes et d'organiser les méthodes & les outils supports du référentiel des besoins (processus de capture, référentiels d'ingénierie & documentaire, etc.), grâce à la connaissance de l'environnement (dans le §2.7)
- de fournir des points d'entrée pour le travail d'architecture fonctionnelle grâce à l'analyse des scénarios opérationnels associés aux différents cas d'utilisation d'un système d'information qui décrivent notamment toutes ses interactions externes.

3.1.2.1. Architecture de l'environnement :

Un système est entouré par un certain nombre de partie prenante, l'ensemble monde étant trop vaste il est nécessaire d'identifier quelles seront les partie prenantes en interaction avec notre système.

2 types d'interactions sont possibles :

- 1) Soit le système agit sur son environnement (sortie du système, entrée de l'environnement)
- 2) Soit l'environnement agit sur le système (entrée du système, sortie de l'environnement)

Ramifions pour identifier cet environnement ces deux interactions.

Les sorties du système peuvent être de deux types pour l'environnement :

- 1) Positive : le système « rend un service à son environnement », et c'est d'ailleurs la raison pour laquelle il est conçu en général
- 2) Négative : le système « perturbe » (pollution, dérangement, désagrément)

L'environnement peut agir aussi sur le système de deux façons

- 1) Positive : l'environnement « rend service au système », il le conçoit le produit l'utilise le maintient, il permet que le système existe
- 2) Négative : l'environnement « perturbe le système », il l'empêche de fonctionner correctement, le contraint

Pour construire l'architecture de l'environnement de SAHARA, on répondra donc aux questions suivantes :

- Quelles sont les parties prenantes auxquelles le système rend service (ou peut être utile)
- Quelles sont les parties prenantes qui pourraient être perturbées par le système avant pendant ou après son fonctionnement (tout au long de son cycle de vie)
- Quelles sont les parties prenantes qui pourraient perturber le système dans son fonctionnement
- Quelles sont les parties prenantes participant à la conception du système
- Quelles sont les parties prenantes autorisant la production et à la mise en service du système
- Quels sont les parties prenantes outils à partir desquels le système a été conçu

L'architecture d'un environnement peut être infinie c'est la raison pour laquelle ici il a fallu faire des choix quand au niveau d'abstraction imposée. La solution proposée est une des visions possible de l'environnement mais ce n'est pas la seule. Le tableau ci-dessous présente donc nos réponses dans l'ordre aux questions posées. Sont marqués d'une croix les parties prenantes qui ont été jugées trop éloignées du système pour être interrogé lors de la spécification des exigences. Elles seront gardées en mémoire mais ne seront pas consultées

Exemple : les passagers a part en tant que contrainte (obstacle a la propagation), ne sont pas une partie prenante que nous iront interroger

| | | | | | | |
|------------------------------|-------------------------------|---|--|---|--|--|
| Pilote | Equipe de maintenance | Systémier équipementier constructeur | Avionique | Compagnie aérienne | Personnel naviguant | Passager |
| Système électrique à bord | Alimentation | Système configuration de l'aéronef | Système avionique | Système propulsion et auxiliaire | Système mécanique | Système gestion environnement |
| Radars | Autres aéronefs (à proximité) | Appareil émettant des ondes électromagnétique | Climat (t° humidité) | Oiseaux | Pression | foudre radiation |
| Equipe de conception | Equipe de production | Equipe de certification | Norme DO160 | Normes sanitaire | Association de consommateur | Système de fréquence |
| Système politique | Système de recyclage | Système marketing | Système économique et budgétaire | Ensemble des fournisseurs | Système aéronef | Donneur d'ordre |
| Système logiciel | Système des matériaux | Système des standard | Système de connaissance et ensemble de retour d'expérience | Système technologique | Système de modélisation | Ensemble des outils de test |

Figure 16.1 : parties prenantes possibles

Une fois les parties prenantes identifiées et triées en fonction de la nature de leur interaction avec le système, il faut hiérarchiser ces parties prenantes afin de créer une architecture de l'environnement :

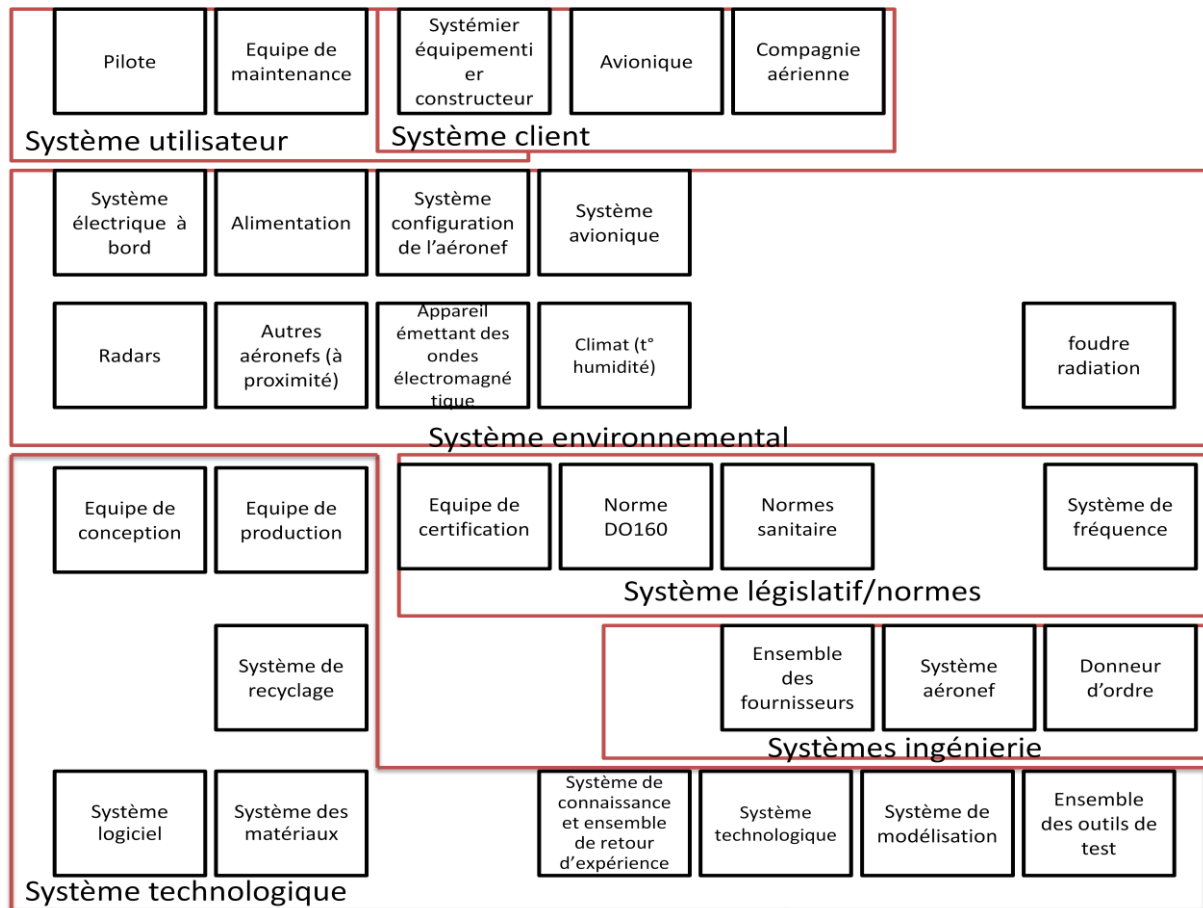


Figure 16.2 : Partie prenantes retenues

On obtient alors la hiérarchie suivante qu'on utilisera pour spécifier les exigences. Chacune de ces parties prenantes sera prise en compte car il apparaît que le non respect de leurs exigences pourrait mettre en péril le système dès le départ.

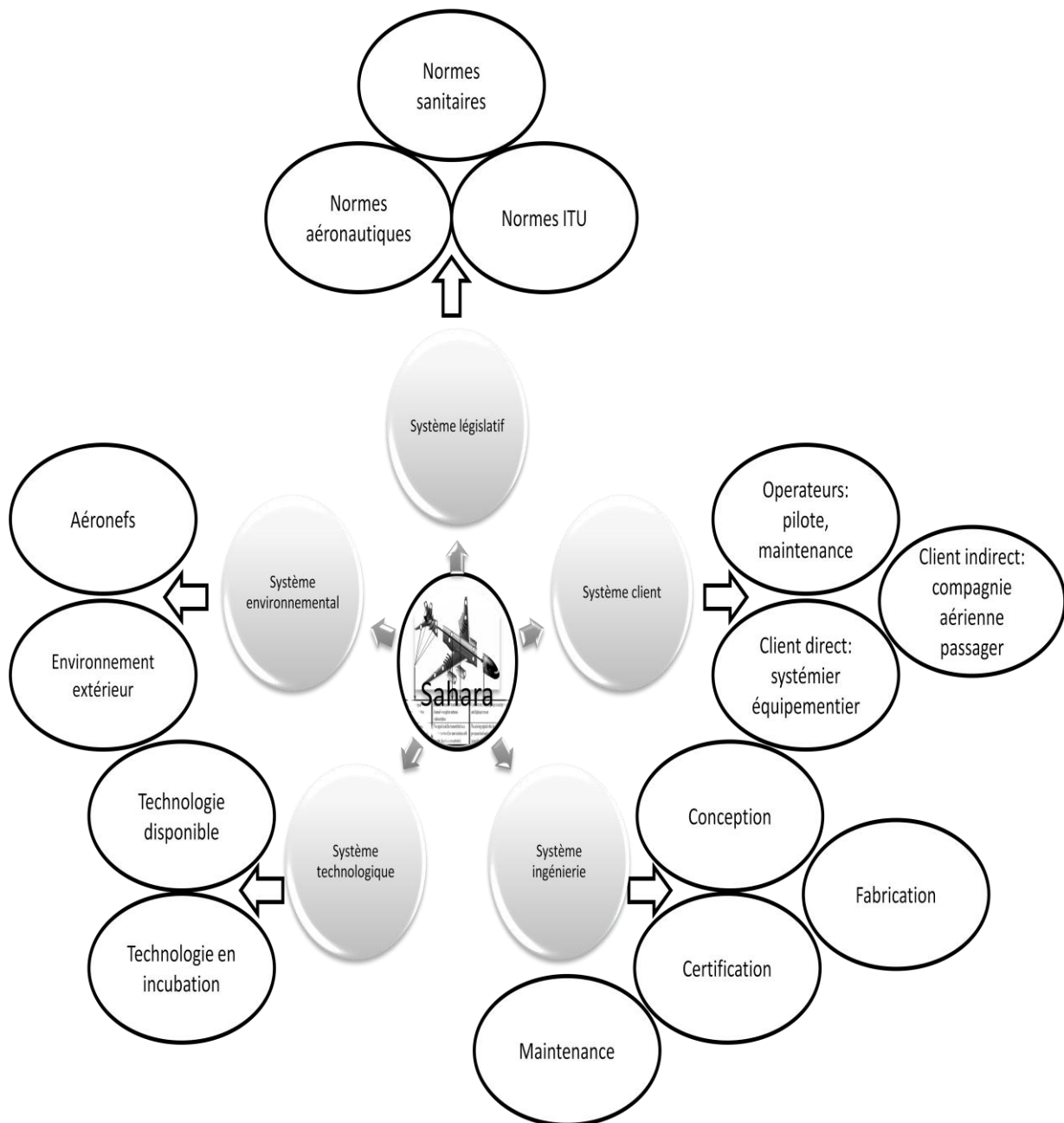


Figure 17 : architecture environnementale choisie pour spécifier l'ensemble des exigences

Reste à présent à établir les interactions entre les parties prenantes et le système SAHARA

| Système externe | Définition | Impact |
|-----------------------------|--|---|
| Système législatif | Ensemble de normes créée 1) pour contrôler les utilisations des bandes de fréquence 2) pour réserver celle-ci si besoin est pour SAHARA 3) Pour protéger la santé des passagers | - SAHARA doit respecter les normes en vigueur - Le système législatif mettra en place une bande de fréquence pour SAHARA |
| Système ingénierie sociétal | Ensemble des acteurs soutenant SAHARA | - Le système ingénierie conçoit fabrique et test SAHARA |
| Système client/ utilisateur | Ensemble des acteurs qui utiliseront et agiront sur SAHARA tout au long de son cycle de vie Ensemble des systèmes operateurs profitant de SAHARA | -SAHARA donne spontanément des informations sur l'environnement et l'état de l'aéronef aux operateurs -Les utilisateurs demandent à SAHARA des informations particulières à un instant t -SAHARA améliorera le produit final acheté par le client et le rendra plus compétitif -Le client peut faire modifier SAHARA |
| Système environnement | Ensemble des éléments entourant le système cible susceptible ou non d'interagir avec celui-ci | -SAHARA ne devra pas endommager son environnement et résister à l'influence de cet environnement |
| Système technologique | Ensemble des briques technologiques à disposition pour concevoir SAHARA | -SAHARA devra contenir un maximum de briques technologique existantes (pour optimiser les compatibilités et minimiser les couts de développement) -Le domaine technologique pourra connaitre de nouvelles avancées grâce à SAHARA |

Nature des interactions entre le système SAHARA et ses systèmes environnants

3.1.2.2. Contexte opérationnel

3.1.2.2.1. Pour le système avion

Lors du projet SAHARA le consortium (SAFRAN : utilisateur final) a défini plusieurs applications :

- Trains d'atterrissage : capteur de pression dans les roues ; instrumentation des freins et des systèmes hydraulique ; capteurs de positions dans les jambes et les amortisseurs.

- Moteurs : Instrumentations sur bancs au sol et engin en vol. Paramètres non critiques

(Pas de commandes) mais informations sur la structure et fatigue ; partie mobile.

- Ailes : fatigue structurelle des pièces (fixes et mobiles) ; capteur de positions pour les volets;

- Tronçon principal : Fatigue structurelle ; paramètres de confort des passagers

(Température de la cabine, humidité, pression, etc.) ; remonté d'informations de la soute ; appel du personnel naviguant etc.

Ces applications seront mises à jour en fonction des retours du projet mais aussi des remontés de la part d'équipementiers avionique sur les parties considérés.

Zones d'emplacement des capteurs (schéma de principe) :

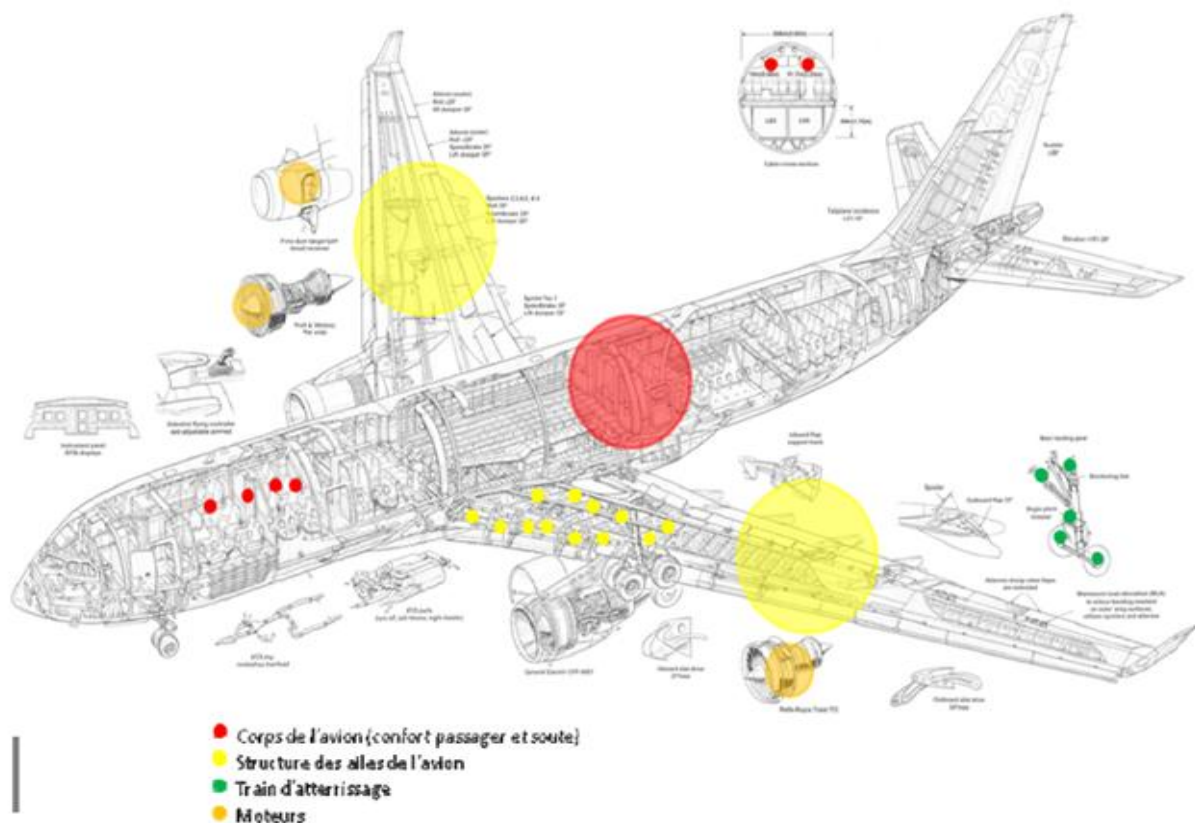


Figure 18 : applications avion

3.1.2.2.2. Pour le système hélicoptère:

Lors du projet SAHARA le consortium (Eurocopter : utilisateur final) a défini plusieurs applications :

Application pale d'hélicoptère

Le système doit permettre une installation sur pale d'hélicoptère pour laquelle on a N émetteurs (max 20) vers un récepteur.

Les émetteurs peuvent être situés sur l'intrado ou l'extrado de la pale, sur toute sa longueur. Ils peuvent aussi être installés au sein de la pale. L'antenne du récepteur sera situé en partie statique, sous les pales.

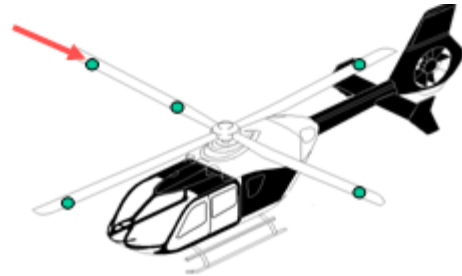


Figure 19.1 : application hélicoptère : pale

Il est à noter que, dans le cas d'une installation sur extrado de la pale, les antennes émetteur/récepteur seront alternativement en LOS et NLOS.

Application contrôle santé structure

Le système doit permettre une installation sur pale d'hélicoptère pour laquelle on a N émetteurs (max 200) vers un récepteur.

Les émetteurs peuvent être situés au sein de la structure (composite, aluminium) ou sur la structure de l'hélicoptère, typiquement sur les parties travaillantes (zone rotor de queue, rotor principal). L'antenne du récepteur sera située en cabine.

Application interne boîte de transmission

Le système doit permettre une installation au sein d'une boîte de transmission pour laquelle on a 8 émetteurs vers un récepteur.

Les émetteurs peuvent être situés au niveau des satellites d'un étage épicycloïdal. L'antenne du récepteur sera située sur la paroi.

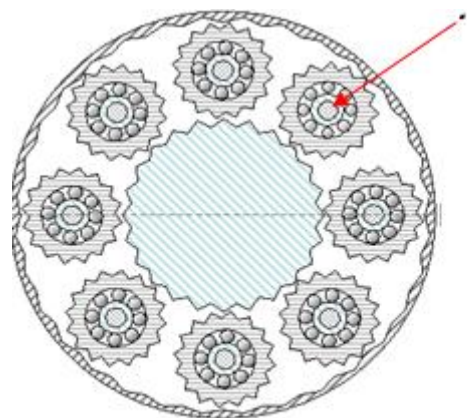


Figure 19.2 : application hélicoptère : boîte de transmission

3.1.2.2.3. Pour le système lanceur :

Le consortium (Astrium: utilisateur final) a défini plusieurs applications :

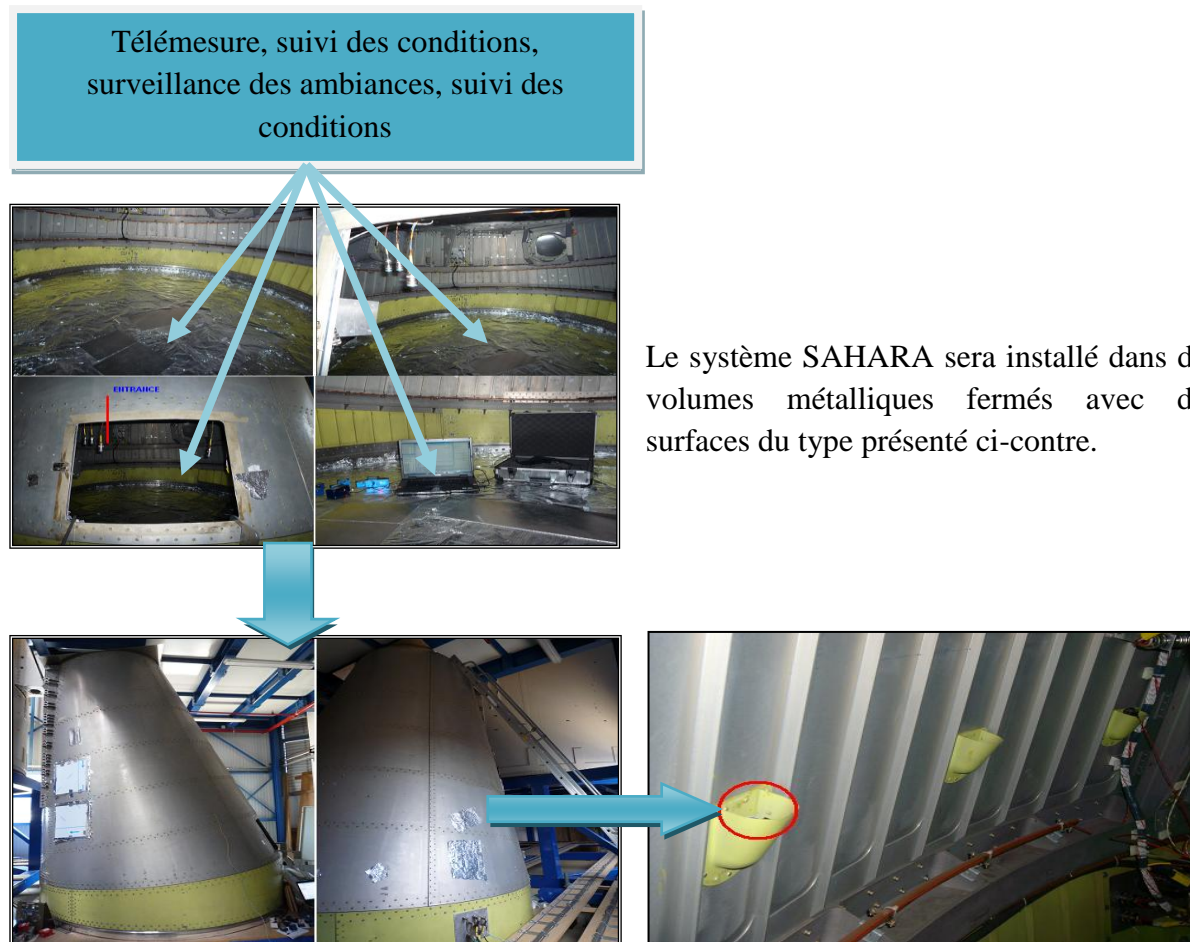
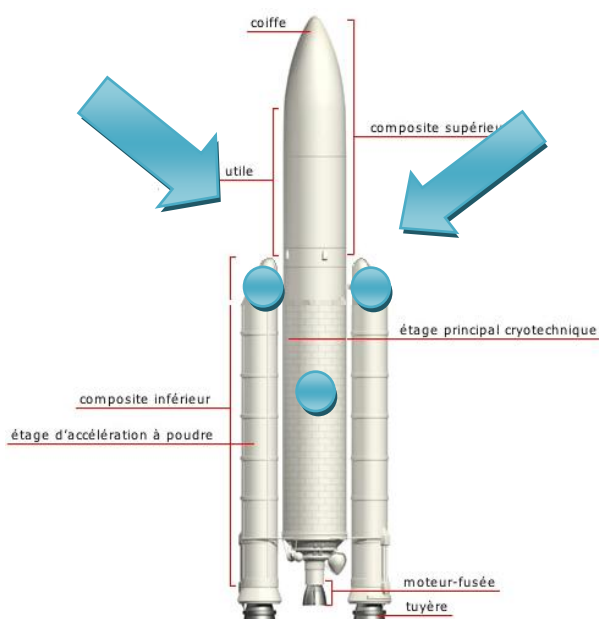


Figure 20 : Détail d'une partie de virole avec raidisseurs détournés.



Moteur-fusée : Il assure la propulsion du lanceur par la combustion de l'hydrogène liquide au contact de l'oxygène liquide.

Étage d'accélération à poudre : Il fournit l'essentiel de la poussée lors du décollage avant de se séparer de l'étage principal cryotechnique.

Étage principal cryotechnique : Corps central qui assure la propulsion après la séparation de l'étage d'accélération à poudre.

Composite inférieur : Il se compose de l'étage principal cryotechnique et de l'étage d'accélération à poudre.

Coiffe : Extrémité du lanceur qui renferme et protège la charge utile.

Composite supérieur : Il se compose de l'étage à propergol stockable et de la charge utile.

Tuyère : Partie terminale d'une fusée par laquelle s'échappent les gaz de combustion, créant ainsi la poussée qui propulse le vaisseau.

Charge utile : Sonde spatiale ou satellite transporté par le lanceur

On récapitule donc les applications retenues pour chaque type d'aéronef

Application avion :

- Voilure, structure aéronef
- Train d'atterrissage ou mécanique en mouvement, ou ensemble arrimés
- Instrumentation banc moteur et environnement moteur

Application hélicoptère :

- Instrumentation pales (sondes températures, efforts, Pression)

Application lanceur

- Mesure technologique - Capteurs haut et basse cadence d'acquisition
- Mesure opérationnelle - Capteurs haute et basse cadence d'acquisition
- Mesure opérationnelle ou fonctionnelle en phases de production

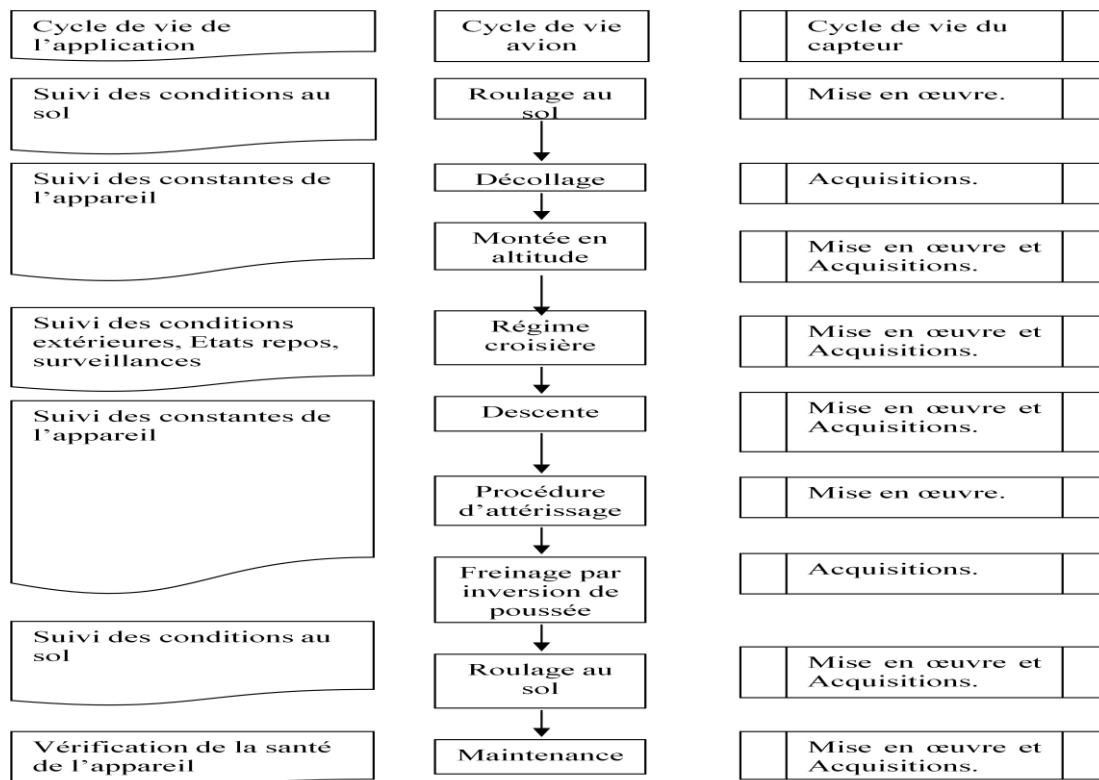
Vous pourrez trouver ces applications et leur définition détaillée en **annexe 3**.

3.1.2.3. Cycle de vie

Pour construire les schémas ci-dessous on a, à partir du cycle de vie des différents aéronefs, étudié avec les différentes applications qui pourraient être en activité selon la phase dans laquelle se trouve l'aéronef et on s'est intéressé de savoir si le système SAHARA relatif se trouvait en phase de mise en œuvre (activité d'échange d'information) ou en phase d'acquisition (phase passive ou de stockage). Cette parallélisation nous permet d'avoir en fonction de l'état de l'aéronef, le type d'application qui seront utilisées ainsi que les états du système SAHARA

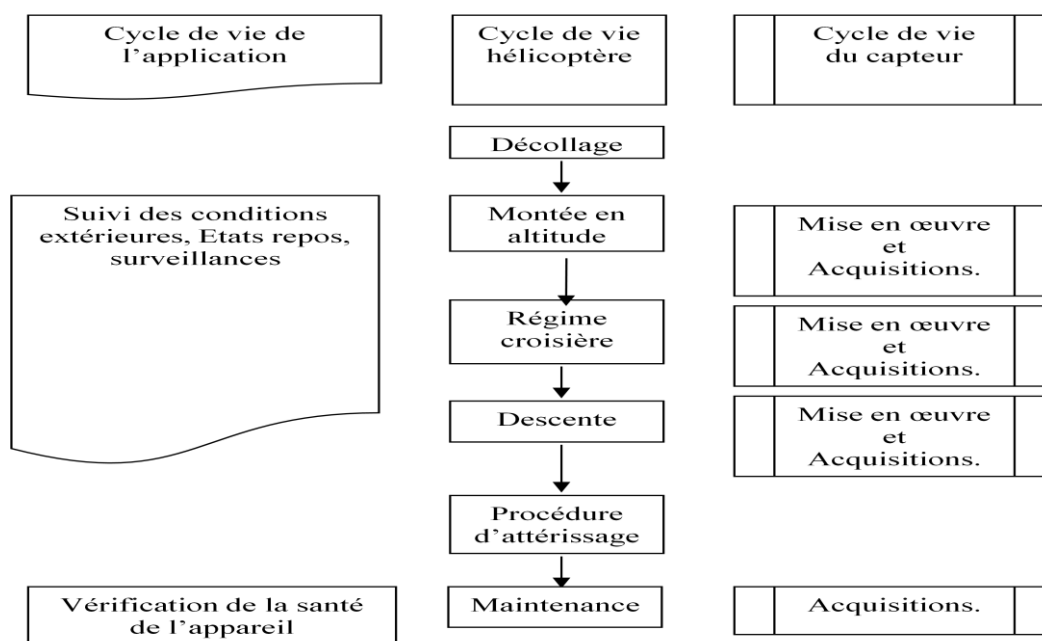
3.1.2.3.1. Cycle de vie d'un avion :

On s'intéressera au cycle de vie au sol et en vol d'un avion

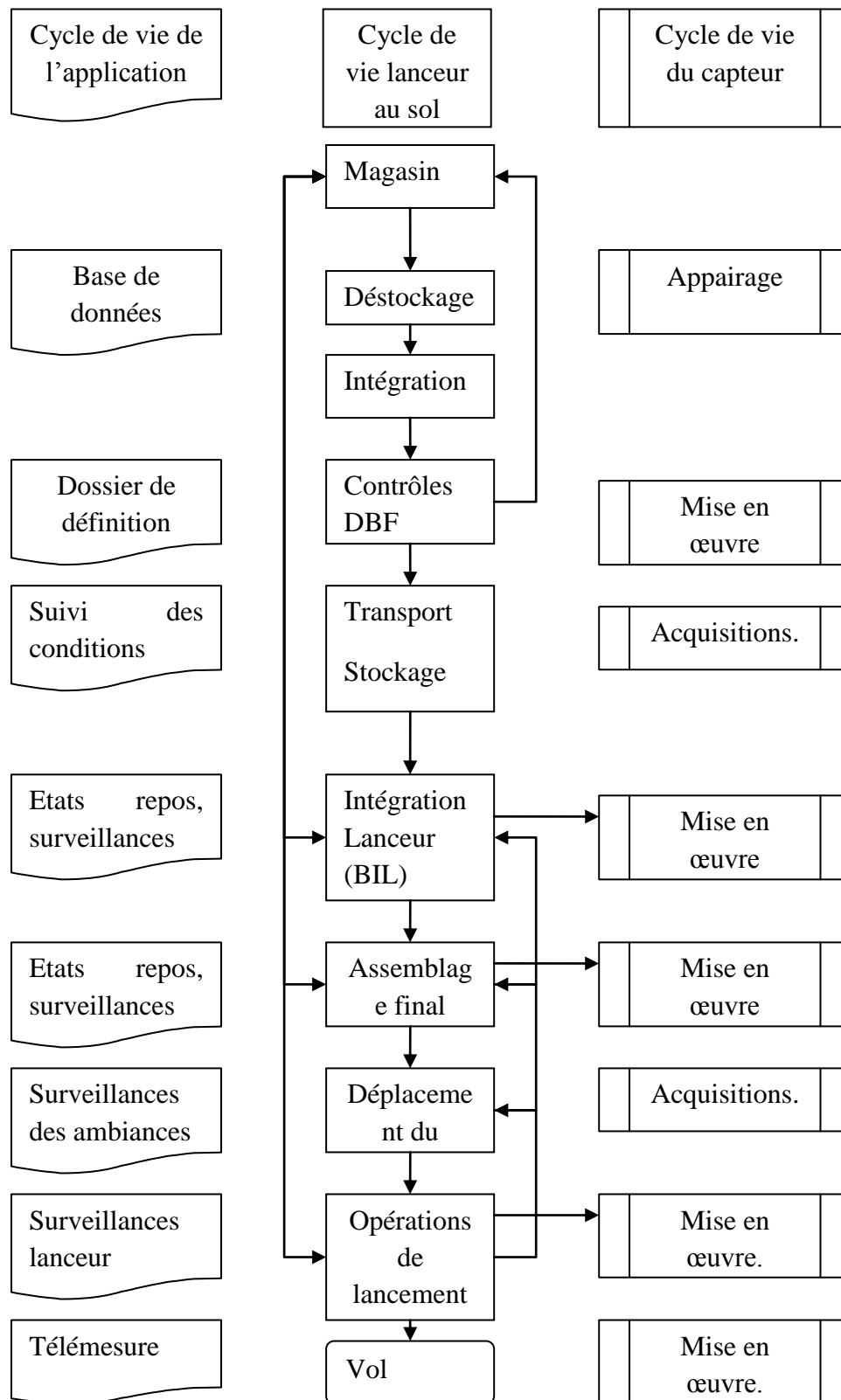


3.1.2.3.2. Cycle de vie d'un hélicoptère :

On s'intéressera au cycle de vie au sol et en vol d'un hélicoptère ce qui se passe au sol ne nous intéresse pas sauf pour la maintenance et comme explicité précédemment ce sont principalement les conditions environnementales extérieures à l'hélicoptère que l'on cherche à surveiller (application pales)

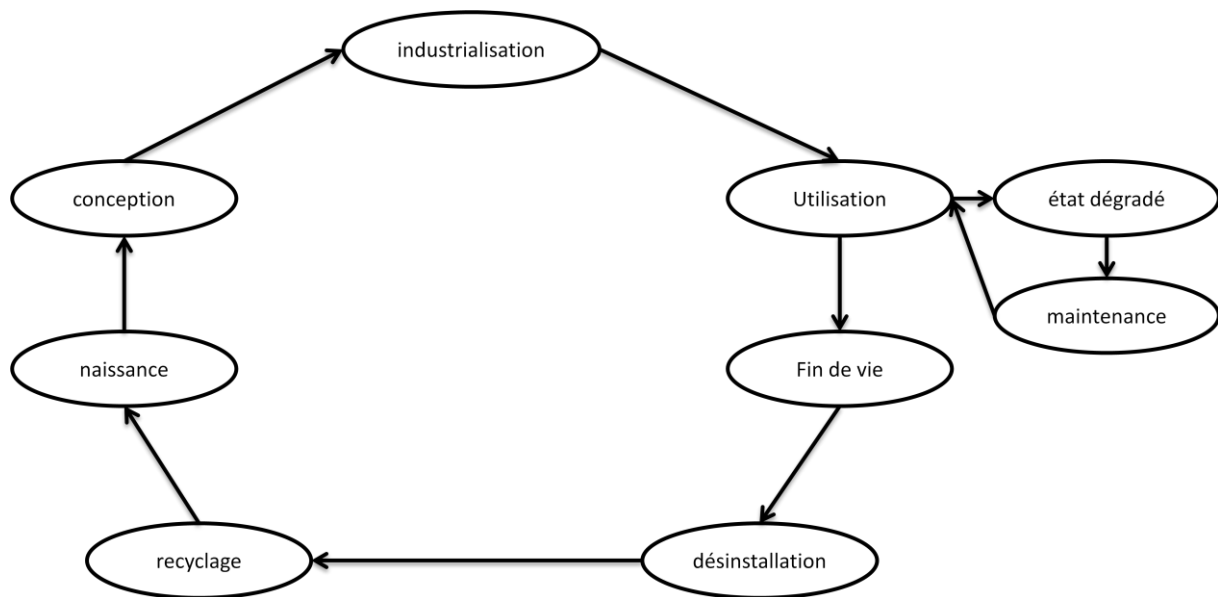


Cycle de vie d'un lanceur au sol : on s'intéressera au cycle de vie du capteur au cours de la portion de vie du lanceur au sol. Ce qui se passe une fois que le lanceur décolle ne nous intéresse plus puisqu'on cherche essentiellement à faire, dans ce cas précis, de la surveillance et de la télémétrie au sol

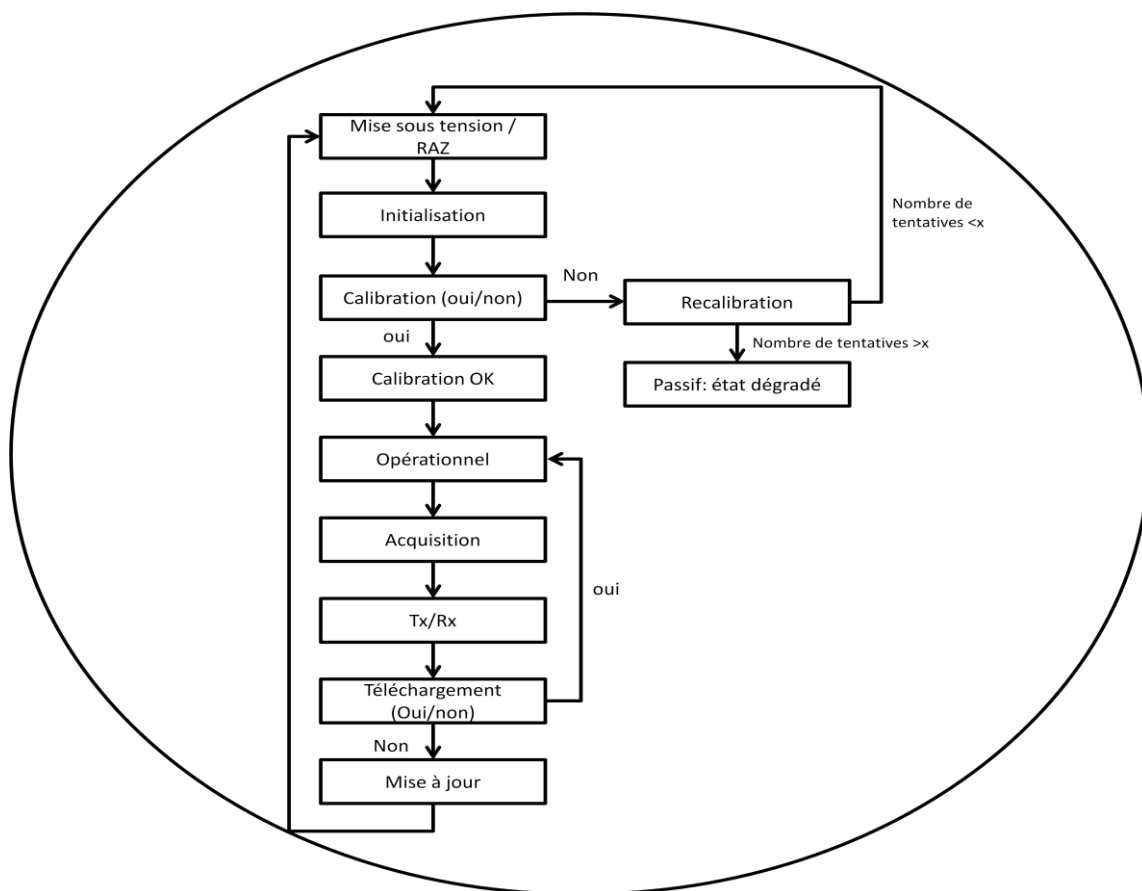


3.1.2.3.3. Cycle de vie produit :

On conclura sur le cycle de vie que l'on souhaitera voir appliqué pour le système SAHARA et qui conviendrait dans les trois cas.



Détail de la sphère d'utilisation pour SAHARA :



3.1.3. Une mission accomplie pour chaque acteur

3.1.3.1. Cas d'utilisation

La vision « haut niveau » d'un système doit tenir sur un nombre très limité de diagrammes simples à comprendre et à partager avec tous les acteurs clefs concernés, qu'il faudra ensuite affiner progressivement

Un cas d'utilisation d'un système est une spécification statique d'un contexte opérationnel où l'on décrit tous les systèmes externes qui interviennent dans le contexte considéré ainsi que leurs interactions (tant entre eux qu'avec le système analysé) dans ce contexte

Pour réaliser les diagrammes d'utilisation et les scénarios opérationnels, on s'est servi d'un logiciel de modélisation SySML (Artisan d'ATEGO) dont vous pourrez retrouver la décomposition **en annexe 4**.

Diagramme d'utilisation pour hélicoptère et avion : comme on l'a mentionné auparavant, les acteurs principaux qui entrent en interaction avec le système SAHARA sont d'une part le pilote (qui représente le centre de décision en général) et d'autre part, les équipes de maintenance. Les actions peuvent être résumées grossièrement dans le schéma suivant et seront détaillées par des scénarios opérationnels plus précis plus bas.

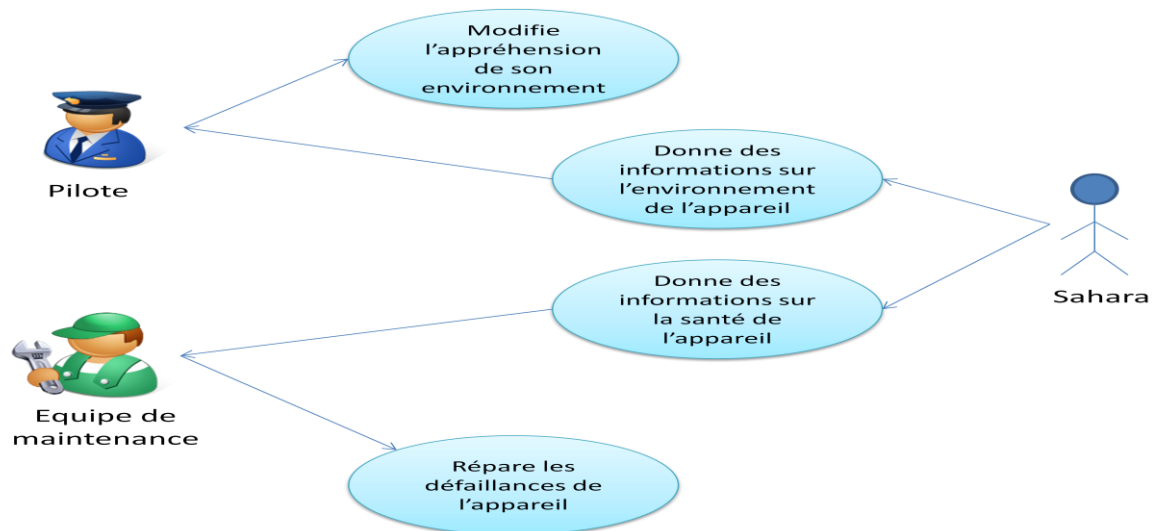


Figure 21 : cas d'utilisation hélicoptère et avion

Diagramme d'utilisation pour lanceur : le contexte opérationnel des lanceurs diffère du contexte avion ou hélicoptère car l'utilisation du système SAHARA n'est pas la même. Il s'agira la de faire de la télémessure au sol dans le but d'avoir des informations sur l'évolution de l'appareil afin que les équipes de maintenance soient mieux aiguillées et que les équipes de conception affinent leurs paramétrages

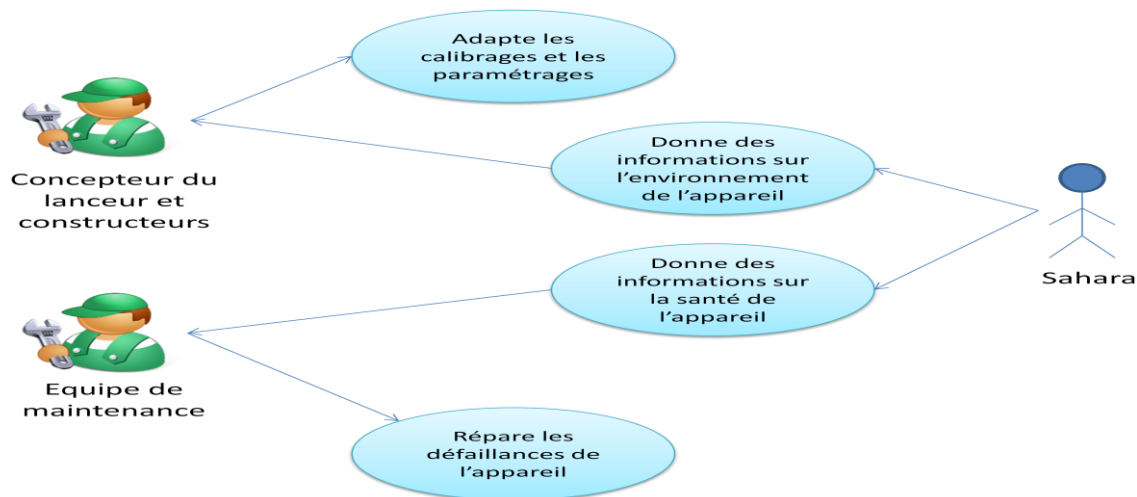


Figure 22 : cas d'utilisation lanceur

3.1.3.2. Scenario opérationnel

Un scénario opérationnel d'un système est une spécification dynamique d'un contexte opérationnel où l'on décrit la succession des activités (couplées) et des échanges entre les systèmes externes et le système qui couvrent l'ensemble du contexte considéré

Voici le scénario opérationnel que l'on peut construire autour du contexte hélicoptère ou avion du pilote dans les deux cas de données possibles (normal et anormal)

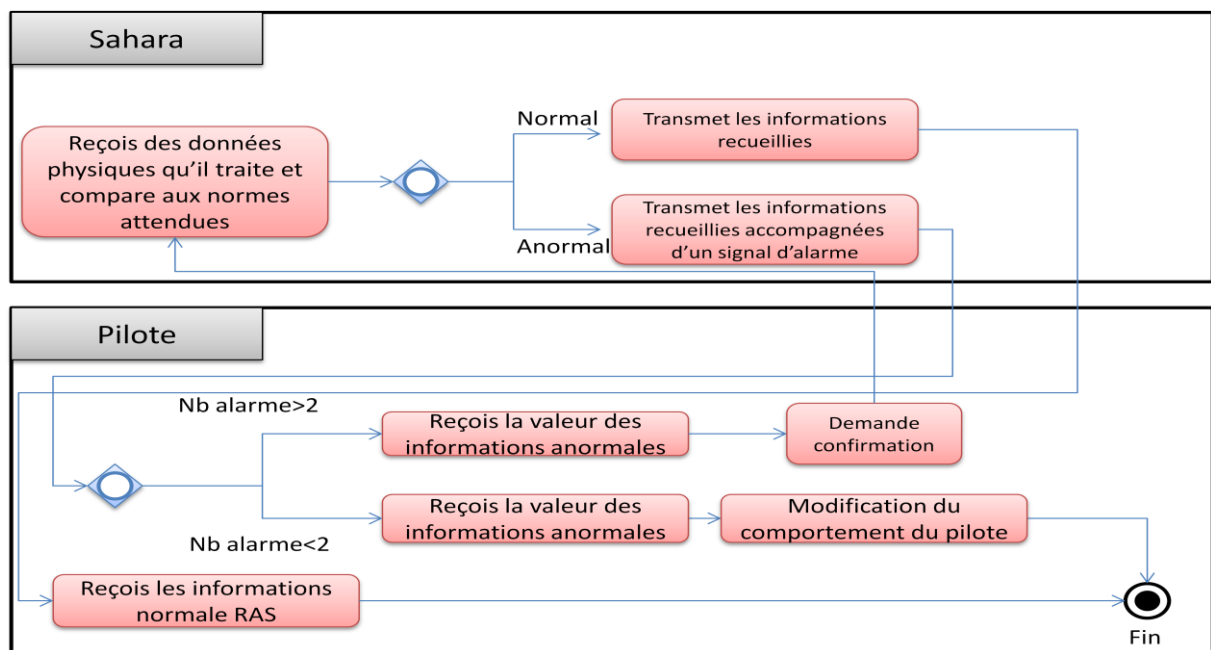


Figure 23.1 : scénario opérationnel Sahara/pilote avion et hélicoptère

Ici on représente le scenario opérationnel que l'on peut construire autour du contexte hélicoptère ou avion de l'équipe de maintenance quand du matériel est détecté comme défaillant (contrôle de santé de l'aéronef)

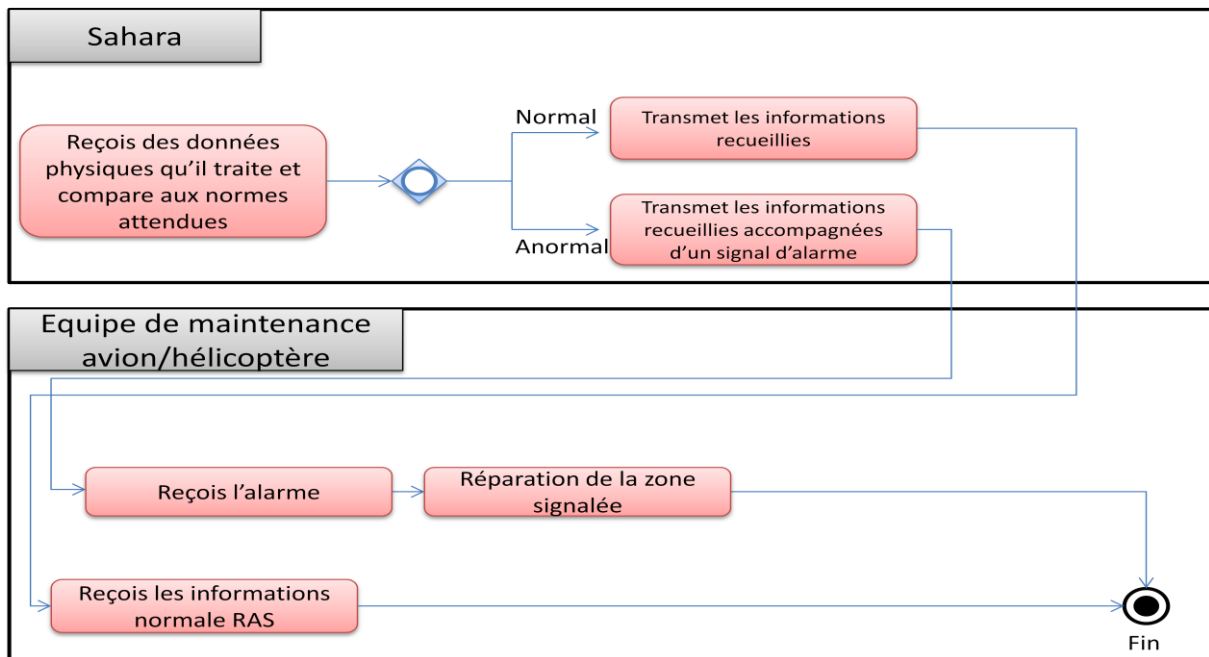


Figure 23.2 : scenario opérationnel Sahara/équipe de maintenance avion hélicoptère

Voici le scenario opérationnel construit autour du contexte lanceur de l'équipe de maintenance quand du matériel est détecté comme défaillant (contrôle de santé de l'aéronef)

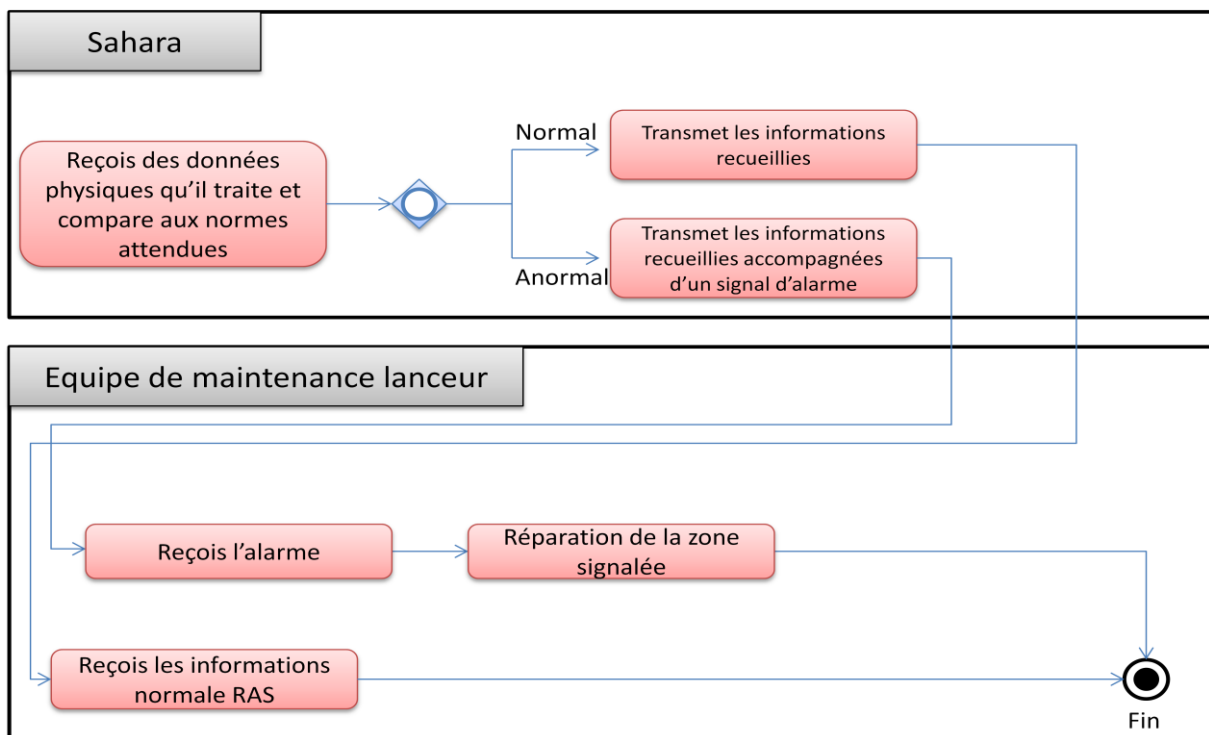


Figure 23.3 : scenario opérationnel Sahara/équipe de maintenance lanceur

Le scénario opérationnel que l'on peut construire autour du contexte lanceur de l'équipe de conception pour de la télémessure aidant à améliorer l'appareil

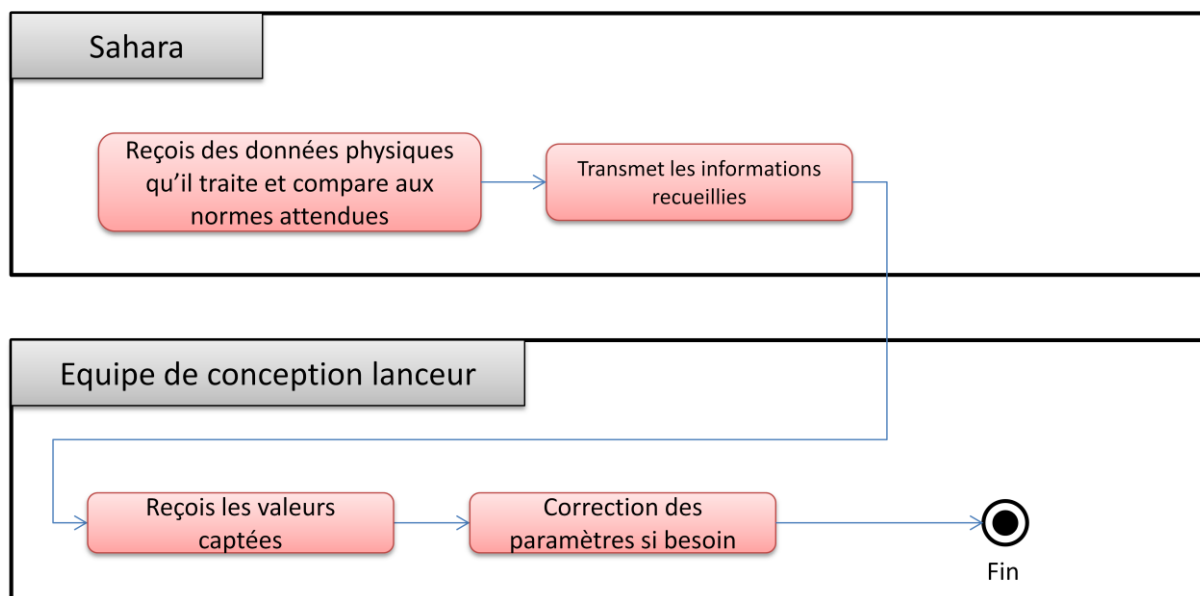
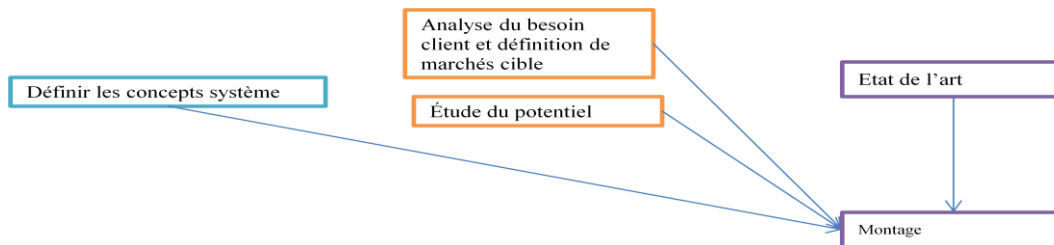


Figure 23.4 : scénario opérationnel Sahara/équipe de conception

3.2. Montage

La phase de montage d'un projet sert à convaincre des financeurs (institutions, investisseurs, direction financière etc..) de financer l'innovation. Pour ce faire, il faut apporter certains arguments qui permettront de mieux comprendre ce que l'on cherche à réaliser.



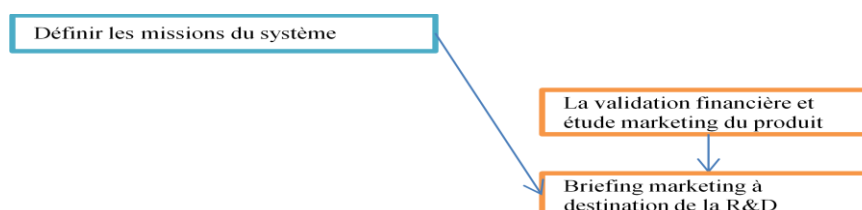
3.2.1. Briefing marketing : levée d'une incompréhension :

Lors de la conception d'un nouveau produit de nombreuses incompréhensions peuvent survenir du à un manque de communication entre les entités actrices. Il est de bon ton de préparer des outils permettant de bien se faire comprendre. On distingue bien trois mondes.

- Le client qui exprime un besoin, paie pour la réalisation d'un système répondant à ses besoins et utilise, grâce à une documentation fournie, ce système.
- Les techniciens qui conçoivent et produisent un système ainsi que la documentation relative, de même qu'ils en assurent la maintenance.
- Les commerciaux, consultants, responsables marketing, et même parfois les chefs de projet, qu'on regroupera dans la catégorie orienté business sont responsables de la récupération des besoins et de la vente du système.

Le client n'exprime pas toujours ses besoins, contraintes et exigences de façon très claire. C'est pourquoi il est essentiel pour que l'information passe bien entre le client et les responsables business de faire plusieurs entretiens, brainstorming et séances de formalisation. Mais une fois que les besoins sont récoltés, la difficulté réside dans la communication entre le monde orienté business et le monde orienté technique.

Avec les éléments réunis d'un coté sur la potentialité du système et sur les clients cibles, et d'un autre coté sur les missions que l'on souhaite voir accomplir notre système, un briefing entre le département commercial et marketing et le département technique de recherche et développement doit être organisée à ce stade afin de faire communiquer ces deux entités et d'arriver à une entente. Cette étape ne peut être réalisée qu'après les conclusions des étapes précédentes de façon à avoir un maximum d'information pour faciliter la compréhension de tous. Cependant étant donné que le cadre ici est un projet de recherche et non pas l'industrialisation d'un produit, le département marketing et commercial ne fait pas parti des acteurs ici (comme mentionné dans l'analyse PESTEL réduite) et n'ont donc pas été sollicités.



3.2.2. Cartographie générale

Cette cartographie permettra de lier les besoins et les contraintes dues aux contextes opérationnels avec les missions du système. Elle servira de point d'appui simplifié pour les non techniciens. Elle évoluera dans un premier temps en fonction des diverses rencontres avec le client puis elle permettra de donner les indications nécessaires aux techniciens pour la conception du système répondant aux besoins

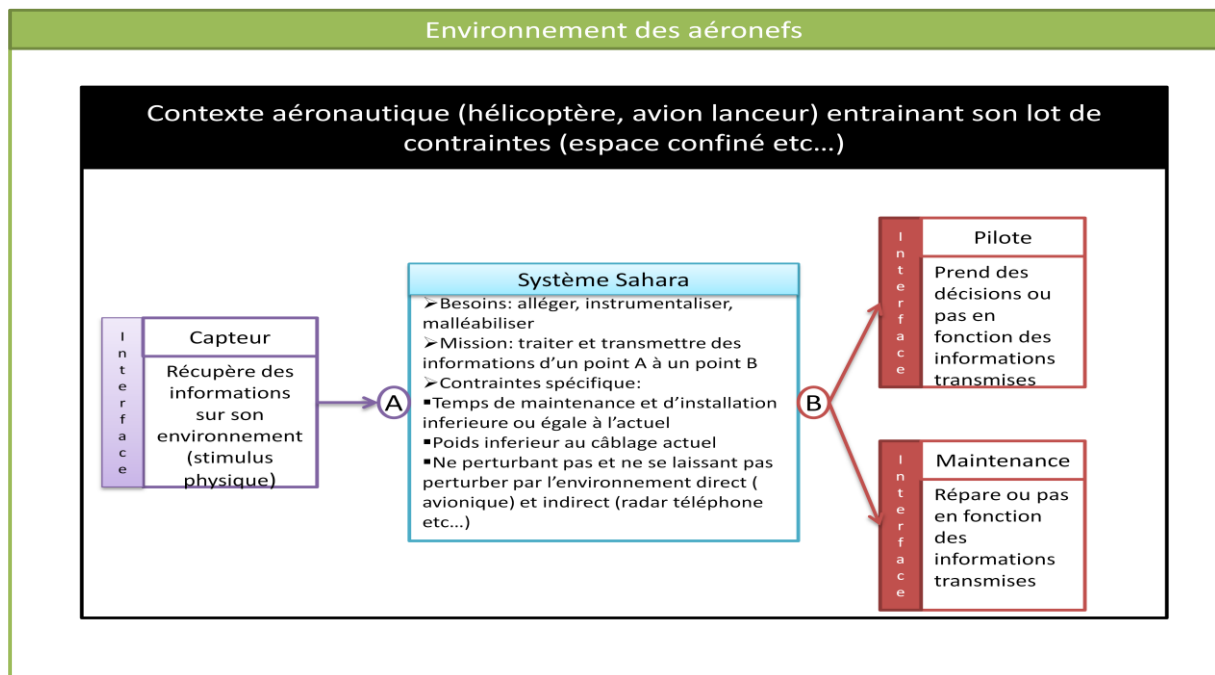


Figure 24 : cartographie générale

Le schéma ci-dessous [Krob3] récapitule les différentes étapes que nous avons suivi afin d'étudier tous les scénarios possibles depuis le §3.1.2.3

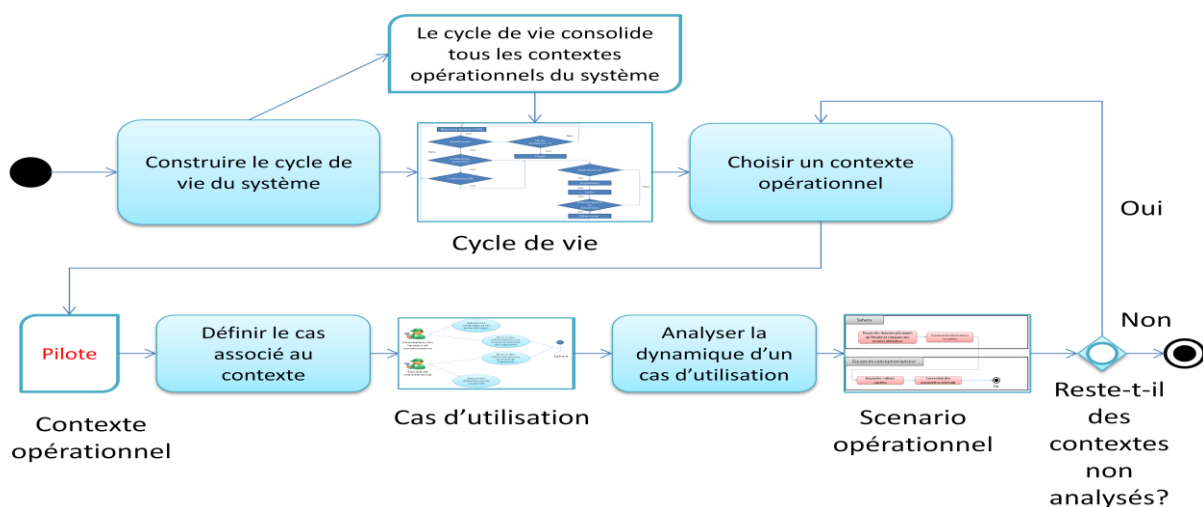


Figure 25 : boucle des scénarios opérationnels

3.2.3. Plan d'action : feuille de route, diagramme de Gantt

Maintenant que le système a été défini, qu'un besoin a clairement été identifié, que la potentialité du système est avérée, et qu'un état de l'art a été rédigé, un projet autour de la conception de ce système peut être lancé et un financement demandé mais pour se faire, il faut présenter un certain nombre d'éléments comme la feuille de route que nous entendons suivre, le planning du projet et les livrables disponibles à chaque étape afin de rassurer nos financeurs

Pour informations voici le découpage en lots que nous avons réalisé pour le projet SAHARA (sur lequel cette thèse se base) qui comme on l'a mentionné plus haut s'inscrit dans un programme FUI (fond unique interministériel). Ce projet est mené par EADS est incluse dans son consortium

- Des donneurs d'ordre/utilisateur finaux : ASTRIUM ST application Lanceurs, EUROCOPTER, EADS Innovation Works application AIRBUS et SAFRAN
- Des PME : GLOBALSYS, BEANAIR, Reflex-CES, OKTAL (simulation propagation)
- Et des académiques : ECE INRIA, EPMI
- Avec l'aimable participation du CNES Direction des Lanceurs

| LOTISSEMENT | | Sorties |
|--|---|--|
| Lot 1 Coordonné par les donneurs d'ordre/ utilisateurs finaux | Définition des exigences | Architectures et contraintes |
| Lot 2 Coordonné par les laboratoires de recherches | Adaptation et durcissement des technologies | Technologies prêtes à l'intégration |
| Lot 3 Coordonné par les constructeurs | Fabrication et essai des démonstrateurs | Démonstrateurs fonctionnels |
| Lot 4 Coordonné par les simulateurs | Adaptation des outils de validation | Outils de validation prêts à l'emploi |
| Lot 5 Coordonné par les utilisateurs finaux | Validation globale des démonstrateurs | Démonstrateurs TRL5 et mesure des performances atteintes |

Découpage en lot du projet SAHARA

suit :

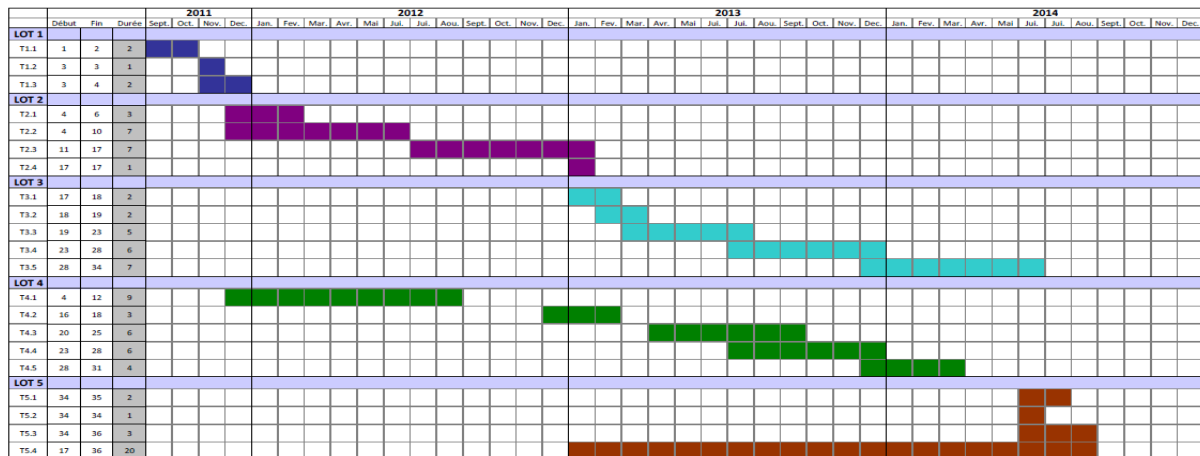


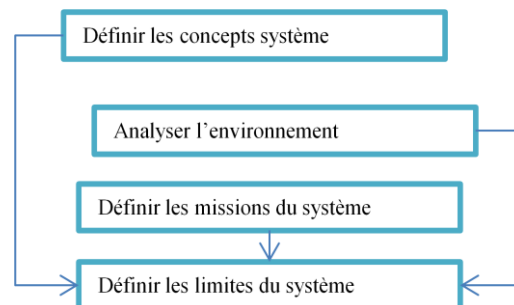
Figure 26 : GANTT du projet SAHARA

Il est primordial que chacun sache exactement ce qu'il doit faire avant de lancer le projet, le cas échéant le taux d'échec s'avère être relativement important.

Mentionnons ici que cette thèse a servi pour le montage du projet (la phase amont et la présentation pour la levée de fond), le lot1 (que nous verrons plus tard dans le chapitre 4), le lot 2 et une partie du lot 3 (comme nous le verrons dans le chapitre 5) et que certains paragraphes écrits pour les besoins de ce mémoire ont été utilisés dans les livrables de ces lots.

3.3. Définition des limites du système : périmètre du produit et définition du système

Dans cette étape il est nécessaire de déterminer ce qui fait partie du système et ce qui fait partie de l'environnement (ce qui n'est pas forcément évident pour certains systèmes et en particulier pour celui que nous étudions là). On procédera alors par élimination grâce aux éléments récoltés dans la définition du concept système concernant les entrées et sorties, ce qui est proche mais ne fait pas parti du système cible et qui de ce fait partagera une interface avec notre système. D'autre part après avoir défini les missions du système on pourra identifier des modules composant le système cible



Le résultat attendu de cette étape sera une définition de ce que l'on considère faisant partie du système : ensemble des modules et interfaces. Le but ici est d'avoir une vision claire de l'effort d'innovation à fournir (et à retrouver en §3.3.3) afin de ne pas réinventer l'existant et d'écarter les verrous technologiques qui n'en sont pas.

3.3.1. Un système borné

Rappelons la configuration générale de notre système

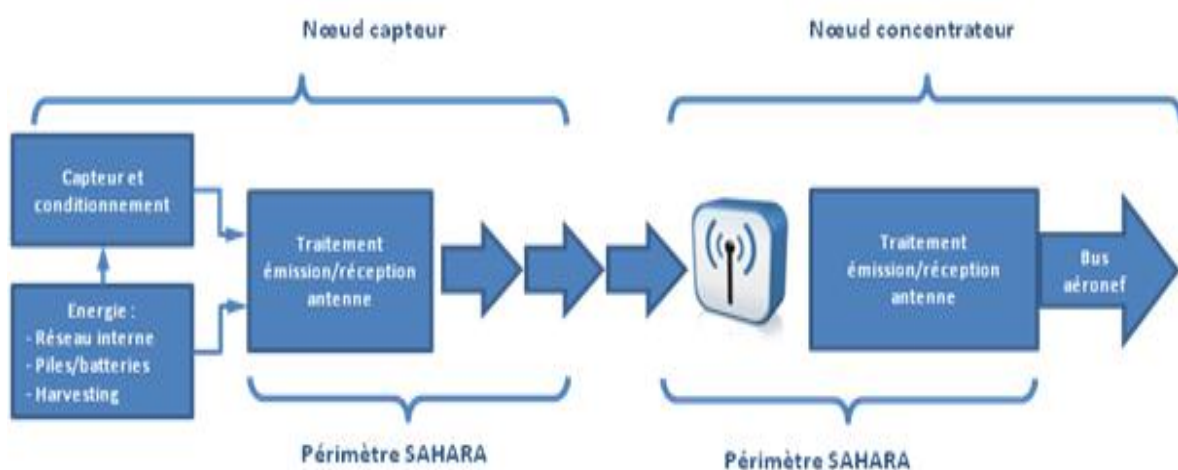


Figure 27 : périmètre de SAHARA

D'après les étapes précédentes et l'analyse effectuée en § 2.5 on peut résumer le concept du système SAHARA à un système de communication sans fil embarqué à bord d'un aéronef dont la mission (comme pour beaucoup de systèmes de communication intelligents) est de :

- Recevoir des données physiques d'un capteur
- Traiter pour en faire un message transportable
- Analyser l'information et la comparer avec les valeurs standards
- Mémoriser, selon l'application et les besoins, l'information reçue
- Transmettre le message au centre de décision relié au Bus, interface entre SAHARA et l'aéronef
- Alarmer les utilisateurs direct (pilote, maintenance, concepteurs) si l'information diffère trop de la valeur standard attendue

L'environnement direct entrant en interaction avec notre système est un aéronef dont les bornes seront les capteurs en entrée et l'interface homme machine.

Détaillons maintenant ce système en le décomposant en bloc chacun responsable d'une mission et entourons-le des blocs d'entrée et de sortie

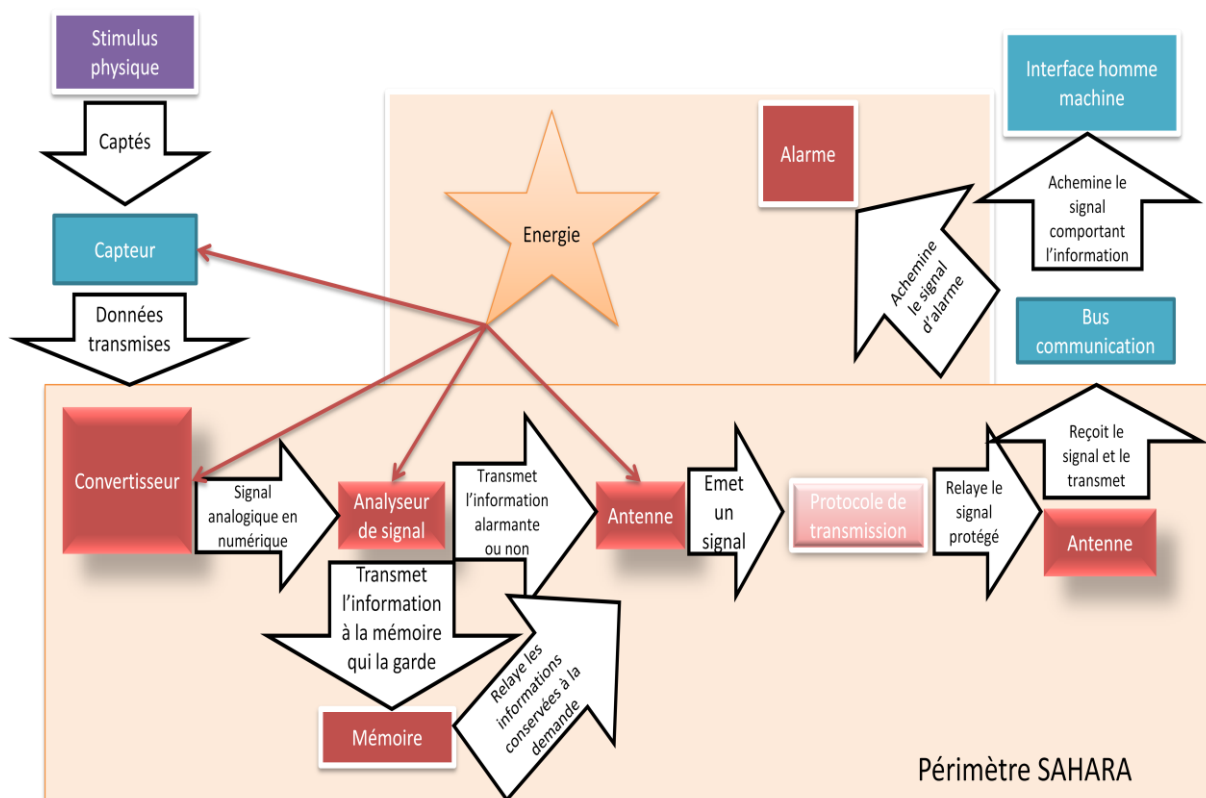


Figure 28 : SAHARA par bloc

Ces blocs s'organisent en module comme suit

- Module 1 : capteur déjà existant sur un aéronef
- Module 2 : traitement qui inclut le convertisseur ainsi que ses interfaces avec le capteur et l'analyseur.

- Module 3 : analyse qui inclut l'analyseur et ses interfaces avec le convertisseur et l'antenne.
- Module 4 : mémoire
- Module 5 : émission qui inclut l'antenne émettrice
- Module 6 : canal sans fil qui inclut l'ensemble des ondes transportant l'information et organisée selon un protocole défini
- Module 7 : réception qui inclut une antenne réceptrice et une antenne émettrice (la même mais qui change de mission selon le besoin)
- Module 8 : bus communication déjà existant dans un aéronef
- Module 9 : interface homme machine (utilisée pour les capteurs déjà existants mais nécessitant probablement quelques adaptations pour s'interfacer avec notre système)
- Module 10 : alarme
- Module 11 : énergie

SAHARA inclut donc les modules : 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, et 11 même si les aspects énergie, comme on l'a sous entendu auparavant et comme on l'expliquera précisément plus tard ne seront pas traités dans le projet SAHARA. Cependant, comme le système SAHARA devra disposer de sa propre alimentation, le module énergie rentre tout de même dans le périmètre système.

3.3.2. Point focal de l'innovation discussion par bloc

Reprenons bloc par bloc le système envisagé et évaluons le gap technologique à franchir

3.3.2.1. Les capteurs

Les capteurs sont des composants de la chaîne d'acquisition dans une chaîne fonctionnelle. Les capteurs prélèvent une information sur le comportement de la partie opérative et la transforment en une information exploitable par la partie commande. Une information est une grandeur abstraite qui précise un événement particulier parmi un ensemble d'événements possibles. Pour pouvoir être traitée, cette information sera portée par un support physique (énergie), on parlera alors de signal. Les signaux sont généralement de nature électrique.

Dans les systèmes automatisés séquentiels la partie commande traite des variables logiques ou numériques. L'information délivrée par un capteur pourra être logique (2 états), numérique (valeur discrète), analogique (dans ce cas il faudra adjoindre à la partie commande un module de conversion analogique numérique).

On peut caractériser les capteurs selon deux critères:

- en fonction de la grandeur mesurée; on parle alors de capteur de position, de température, de vitesse, de force, de pression, etc.;
- en fonction du caractère de l'information délivrée; on parle alors de capteurs logiques appelés aussi capteurs tout ou rien (TOR), de capteurs analogiques ou numériques.

On peut alors classer les capteurs en deux catégories, les capteurs à contact qui nécessitent un contact direct avec l'objet à détecter et les capteurs de proximité. Chaque catégorie peut

être subdivisée en trois catégories de capteurs : les capteurs mécaniques, électriques, pneumatiques.

Principales caractéristiques des capteurs :

- L'étendue de la mesure : c'est la différence entre le plus petit signal détecté et le plus grand perceptible sans risque de destruction pour le capteur.
- La sensibilité : c'est la plus petite variation d'une grandeur physique que peut détecter un capteur.
- La rapidité : c'est le temps de réaction d'un capteur entre la variation de la grandeur physique qu'il mesure et l'instant où l'information prise en compte par la partie commande.
- La précision : c'est la capacité de répétabilité d'une information position, d'une vitesse,...

Dans notre cas des capteurs sont déjà présents à bord des aéronefs. C'est la raison pour laquelle le système devra être compatible avec les capteurs déjà existants et s'adapter aux futurs capteurs qu'on souhaiterait voir implémentés. L'effort d'innovation ne sera donc pas concentré sur les capteurs car le sujet a déjà été largement balayé auparavant et le sera sans doute encore

3.3.2.2. Traitement du signal : convertisseur analogique-numérique dans le cas où le capteur n'en comporte pas

Un convertisseur analogique-numérique (CAN, ADC pour Analog to Digital Converter) est un montage électronique dont la fonction est de générer à partir d'une valeur analogique, une valeur numérique (codée sur plusieurs bits), proportionnelle à la valeur analogique entrée. Le plus souvent il s'agira de tensions électriques. Il existe plusieurs solutions pour convertir un signal analogique en signal numérique. Elles sont classées ici dans l'ordre de la moins rapide à la plus rapide.

Convertisseur à simple rampe : On réalise au moyen d'un compteur et d'un convertisseur numérique-analogique une rampe de tension. Un comparateur arrête le compteur lorsque la tension créée par le Convertisseur numérique-analogique atteint la tension à convertir. Le compteur indique alors le résultat sur N bits, qui peut être stocké ou traité. Leur temps de conversion qui évolue avec la tension à convertir en fait un outil peu utilisé.

Convertisseur à double rampe : Cette évolution des convertisseurs à simple rampe permet de s'affranchir de la dérive naturelle des composants qui le composent. Son fonctionnement repose sur une comparaison entre une référence et le signal à convertir.

Convertisseur à approximations successives : Très proches en termes de composition des convertisseurs à simple rampe, les convertisseurs à approximations successives (aussi appelées pesées successives) utilisent un processus de dichotomie pour traduire numériquement une tension analogique. Les convertisseurs à approximations successives ont des temps de conversion de l'ordre de la dizaine de microsecondes, pour des résolutions d'une douzaine de bits environ.

Convertisseur Sigma Delta : Ce type de convertisseur est basé sur le principe du sur échantillonnage d'un signal d'entrée. Ces convertisseurs sont très adaptés à la conversion de signaux analogiques issus de capteurs dont la bande passante est souvent faible. Les technologies Sigma-Delta ont quasi totalement remplacé les technologies à simple ou double rampe.

Convertisseur flash : Le principe est de générer $2^N - 1$ tensions analogiques au moyen d'un diviseur de tension à 2^N résistances. Les $2^N - 1$ tensions obtenues aux bornes de chacune des résistances sont ensuite comparées dans $2^N - 1$ comparateurs au signal à convertir. Un bloc logique combinatoire relié à ces comparateurs donnera le résultat codé sur N_{bits} en parallèle. Cette technique de conversion est très rapide, mais coûteuse en composants et donc utilisée pour les applications critiques.

Les convertisseurs Flash ont des temps de conversion inférieurs à la microseconde mais une précision assez faible (de l'ordre de la dizaine de bits). Ce convertisseur est souvent très cher.

Pour les besoins de SAHARA on pourra se contenter vu les contraintes de prix, d'énergie et de déterminisme d'un convertisseur à approximations successives ou d'un Sigma Delta. C'est la raison pour laquelle ici encore on ne se concentrera pas sur ce module.

3.3.2.3. Analyse :

Il s'agira de comparer les données reçues avec des données normales. Ce module, sera composé d'un algorithme simple

- Comparer X_n échantillon et val X normal
- Si $X \text{ normale} - y\%(X \text{ normale}) < X_n \text{ échantillon} < X \text{ normale} + y\%(X \text{ normale})$
- Alors envoyer X_n échantillon
- Si $X \text{ normale} - y\%(X \text{ normale}) > X_n \text{ échantillon}$
- Ou $X_n \text{ échantillon} > X \text{ normale} + y\%(X \text{ normale})$
- Attendre X_{n+1} échantillon
- Si $X \text{ normale} - y\%(X \text{ normale}) > X_{n+1} \text{ échantillon}$
- Ou $X_{n+1} \text{ échantillon} > X \text{ normale} + y\%(X \text{ normale})$
- Alors envoyer X_{n+1} échantillon et message d'alarme

La valeur X représente la grandeur physique considérée

La valeur y est l'écart consenti entre la valeur normale et la valeur mesurée (le pourcentage d'erreur acceptée)

Ce module n'existant pas sur le système actuel il devra être créé mais ne représente pas un effort d'innovation majeure

3.3.2.4. Mémoire

On aura selon l'application besoin de mémoire temporaire type buffer en l'occurrence pour faire des comparaisons entre deux mesures. De même, les données reçues de l'extérieur seront stockées dans des tampons en attente de leur analyse et leur acheminement (pour des raisons

d'efficacité, et aussi pour éviter qu'une réception de données trop rapprochées fasse que certaines, non traitées, ne soient perdues).

Une réception trop rapide peut elle aussi bloquer le tampon, avec risque de perte de données ; aussi on pourra dans certains cas très déterministe utiliser un dispositif de contrôle de flux disant à l'émetteur de stopper son émission quand le tampon est dangereusement près de la limite, et de recommencer quand le niveau est redevenu acceptable.

La miniaturisation des circuits intégrés aidant, les mémoires tampons se présentent maintenant sous forme d'une mini carte rectangulaire " barrette ". Nous n'aurons donc pas à nous préoccuper de ce point là

Il existe un large éventail de module de mémoire (Simm, Dimm, SDRAM, RIMM) et le système SAHARA n'a pas besoin de compter de module mémoire trop performant si ce n'est qu'il faudra faire attention à la consommation

3.3.2.5. Émission/réception : les antennes

L'**antenne** est le dispositif permettant de rayonner (émetteur) ou, de capter (récepteur), les ondes électromagnétiques. L'antenne est un élément fondamental du système SAHARA et ses caractéristiques de rendement, gain, diagramme de rayonnement influencent directement les performances de qualité et de portée.

Très généralement, une antenne radioélectrique convertit les grandeurs électriques existantes dans un conducteur ou une ligne de transmission (tension et courant) en grandeurs électromagnétiques dans l'espace (champ électrique et champ magnétique), ceci en émission et inversement en réception. En émission, la puissance électrique est convertie en puissance électromagnétique et c'est l'inverse en réception.

Les caractéristiques principales d'une antenne sont :

Les fréquences d'utilisation : dans le cas de SAHARA, imposé par l'ITU [ITU]

Le diagramme de rayonnement : L'antenne rayonnant de la même façon dans toutes les directions, est un modèle théorique irréalisable dans la pratique. En réalité, l'énergie rayonnée par une antenne est répartie inégalement dans l'espace, certaines directions étant privilégiées. Le diagramme de rayonnement complet peut être résumé en quelques paramètres utiles :

La directivité de l'antenne dans le plan horizontal : Une antenne équidirective ou omnidirectionnelle rayonne de la même façon dans toutes les directions du plan horizontal. C'est la raison pour laquelle on préférera celle-ci dans SAHARA

Le gain définit l'augmentation de puissance émise ou reçue.

Les lobes et zéros secondaire : les directions des émissions d'une antenne sont représentées par les lobes dans lesquels l'antenne rayonne. Aux angles proches du lobe principal de rayonnement, une antenne présente des minima et maxima relatifs appelés « lobes secondaires » qu'on tente de minimiser. Les antennes à grande directivité présentent également des lobes faibles et irréguliers dans tous les autres angles, appelés « lobes diffus ». Le niveau général de

ces lobes secondaires décrit la sensibilité de l'antenne au brouillage ce qui nous importe beaucoup dans SAHARA en effet une direction où le gain est faible peut être mise à profit pour éliminer un signal gênant (en réception) ou pour éviter de rayonner dans une région où il pourrait y avoir interférence avec d'autres émetteurs.

Le rendement : La somme des puissances émises dans toutes les directions définit la puissance effectivement rayonnée. Le rapport avec la puissance fournie par la ligne de transmission définit son rendement. On essaiera dans la mesure du possible d'avoir le meilleur rendement mais encore une fois cela ne sera pas la préoccupation première dans la conception du système au vu des efforts d'innovation déjà en cours de réalisation à ce sujet.

Perturbation d'une antenne par son environnement immédiat : Les objets métalliques situés à une distance de l'ordre de la longueur d'onde pourront produire un effet d'ombre dans la direction considérée, si leur dimension est elle-même de l'ordre de la longueur d'onde ou plus, mais il s'agit là plutôt de phénomènes de "masque" que de perturbations proprement dites.

On sait modifier volontairement les caractéristiques de rayonnement d'un élément rayonnant, par l'adjonction de conducteurs à proximité de cet élément. En revanche des perturbations cette fois non désirées du fonctionnement même de l'antenne apparaîtront par la présence de corps conducteurs, dans l'environnement immédiat de l'antenne.

En conclusion, une problématique importante sur les modules d'émissions et de réception (transmission) va se poser. Une partie des verrous technologiques concernant la propagation des ondes et l'intégrité du message pourrait être levée si l'on parvient à construire une architecture correcte de l'ensemble du module permettant d'éviter les obstacles et d'assurer la bonne transmission des données

Le module de transmission incluant les antennes émettrice, réceptrice et répétitrice du signal (reçoit et réémet le signal) peut se décomposer en un diagramme de bloc comme suit

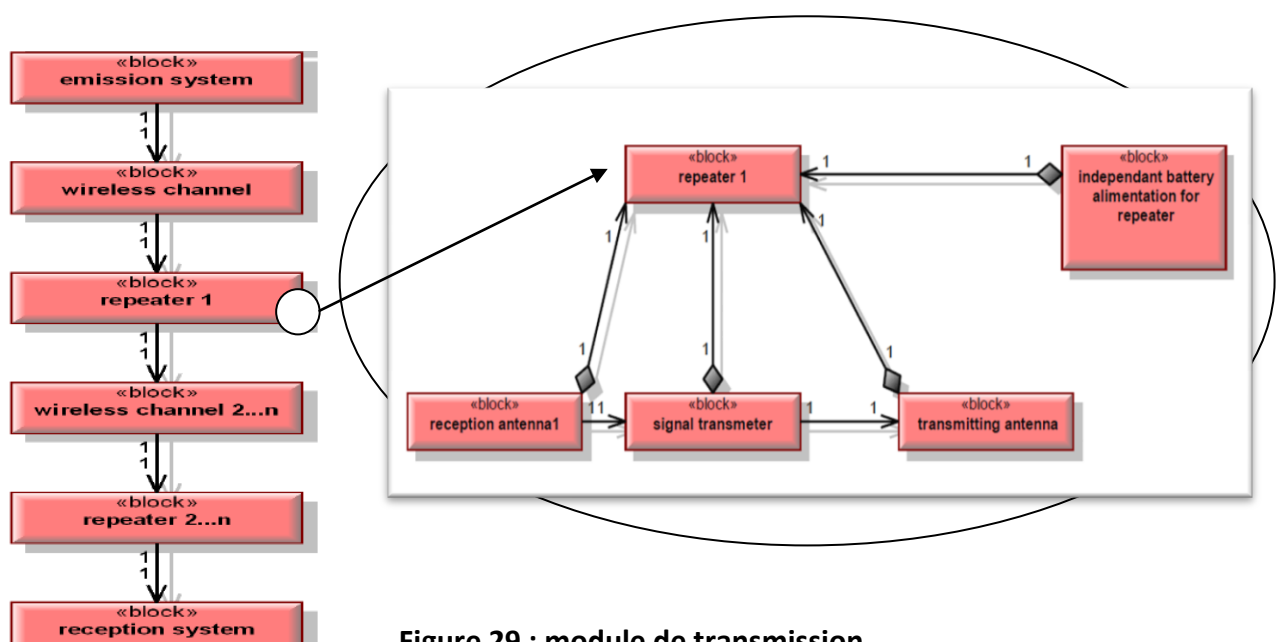


Figure 29 : module de transmission

3.3.2.6. *Protocole de communication par le canal électromagnétique sans fil.*

Le point focal de l'innovation réside sur le protocole et le canal choisi pour le transporter.

Comme mentionné plus haut dans le § 2.1.3, on a envisagé plusieurs types de canaux sans fil du moins commun (ondes optiques) au plus incommode (les ondes sonores) en passant par les plus absurdes (message codé par de la fumée à la mode indienne mais pour des raisons de sécurité il est fortement déconseillé d'allumer un feu à bord d'un aéronef...)

Enfin, il restait les ondes radio électromagnétiques qui sont tout de même les plus utilisées pour transmettre des messages sans fil.

Vint alors la question du protocole à utiliser. De nombreuses normes et protocoles sont disponibles aujourd'hui sur le marché mais aucune ne combine d'une part la sécurité et la sûreté de fonctionnement nécessaire et d'autre part la robustesse dont on aura besoin pour nos applications aérospatiales.

Un état de l'art a été constitué sur les différents protocoles existants. Deux d'entre eux ont été retenus (voir chapitre 2) comme meilleurs compromis car le nombre de technologies disponible était trop grand pour toutes les considérer jusqu'au bout. Cependant il est certain que ceux-ci ne pourront être implémentés tels-quels et que le protocole utilisé à la fin sera un protocole semi propriétaire.

Rappelons les différentes couches du modèle OSI afin de mieux visualiser où va se situer le problème.

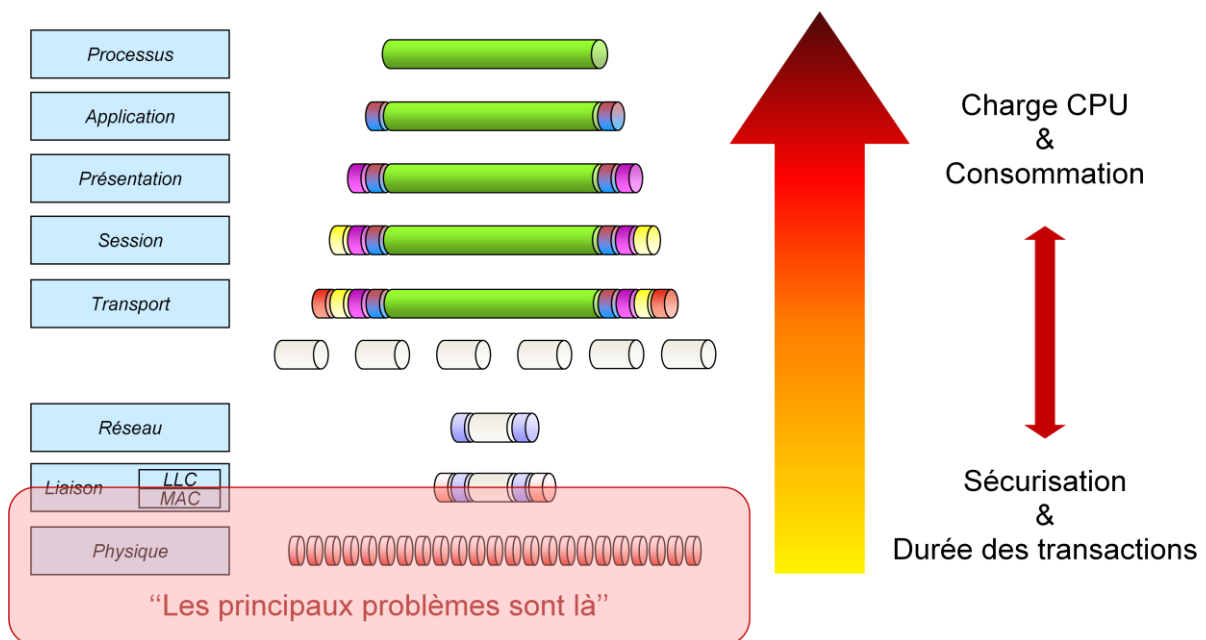


Figure 30 : les différentes couches réseau

Les modifications principales auront lieu sur la couche physique.

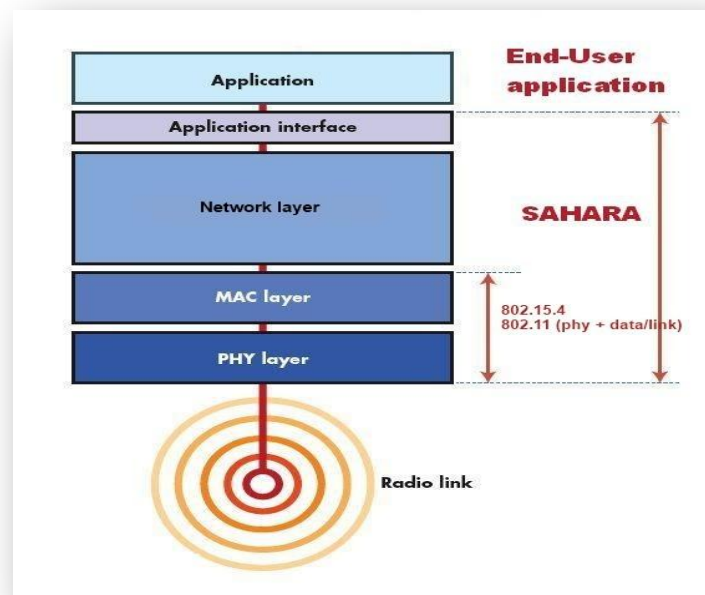


Figure 31 : couche modifiée dans SAHARA

C'est donc sur la sous-couche basse, celle du contrôle d'accès au support (Media Access Control - MAC) qu'il faudra agir. Les protocoles appartenant à cette sous-couche ont notamment comme fonction de réguler les émissions sur un support donné, en particulier lorsque plusieurs stations indépendantes sont susceptibles d'émettre à tout moment sur le même support. Appartiennent également à cette sous-couche la description des formats de trame (cellule élémentaire du transport d'information) et des méthodes de repérage des stations émettrices et réceptrices (adressage).

Il y a deux formes de contrôle d'accès au support : distribuée et centralisée. Chacune d'elle peut être comparée à une communication entre plusieurs personnes.

- Dans une conversation "distribuée", nous attendons que plus personne ne parle pour prendre la parole. Si deux personnes se mettent à parler en même temps, ils s'arrêteront immédiatement, marqueront un temps d'arrêt et commenceront un jeu long et élaboré pour dire "je vous en prie, à vous d'abord".
- Dans une conversation "centralisée", l'un des participants est expressément chargé de répartir les temps de parole entre les différents interlocuteurs.

Les protocoles de la sous-couche MAC ont également comme attribution de spécifier la manière de séparer les trames : comment détecter sur le support qu'une trame se termine et qu'une autre démarre. Il y a quatre manières d'indiquer les séparations de trames : une méthode basée sur le temps, mais qui en cas de perturbation externe, rend la détection d'erreur difficile hors on ne peut pas se le permettre.

Une méthode par comptage des caractères, facilement perturbée si ce champ devient erroné d'une façon ou d'une autre, ce qui rend difficile la distinction entre trames. Reste donc la méthode par bourrage d'octets (byte stuffing) ou par bourrage de bits (bit stuffing).

3.3.2.7. Bus communication/Interface homme machine/Alarme

Les bus de communication existent déjà et transportent la plupart des informations à bord d'un aéronef c'est ce qu'on appelle le « back bone ». On ne cherchera qu'à implémenter des connecteurs compatibles qui viendront se greffer au système existant.

L'interface homme machine peut se présenter de différentes façons mais encore ici le souhait sera d'être compatible avec l'existant et le prévisible futur

L'alarme pourra être une alarme visuelle ou sonore tout dépendra du cas d'application envisagé il existe déjà des alarmes pour certaines applications donc comme pour ce qui est existant un effort sur la compatibilité doit être fourni mais pour les nouvelles applications il faudra envisager de nouvelles alarmes sans pour autant rendre désagréable les conditions d'utilisation (solicitations intempestives et non urgentes pour les pilotes ou pour l'équipe de maintenance)

3.3.2.8. Énergie

Le système que nous tenterons de mettre en place aura besoin d'une alimentation indépendante aussi bien pour les capteurs que pour les transmetteurs et pour l'électronique de passage

Cahier des charges : alimentation sans fil de taille réduite ne craignant pas l'environnement du système et durant selon l'application

- 2 ans (pour des applications dont la maintenance sera assurée tous les deux ans)
- 10 ans (pour les applications qui ne sont soumises qu'à la grande révision de l'aéronef qui a lieu tous les dix ans)
- 30 ans (pour les applications qui ne seront pas révisées et qui doivent durer aussi longtemps que l'avion)

On prendra le cahier des charges avion puisque celui est le plus contraignant par rapport au lanceur ou aux hélicoptères.

Ce cahier des charges est extrêmement ambitieux et il constitue à lui seul un effort d'innovation bien trop grand pour être traité dans SAHARA. Il pourrait faire l'objet d'un projet à lui seul (projet qui est d'ailleurs en train de se lancer chez Thales). Aussi nous laisserons cette partie de côté qui sera une entrée possible lors de l'industrialisation

3.3.3. Verrous technologiques réels et choix des bornes

L'introduction du « sans-fil » dans un aéronef est très complexe :

- Les ondes électromagnétiques ne se propagent pas bien dans un espace métallique confiné
- Elles sont facilement brouillées par les systèmes de l'aéronef
- Elles risquent de brouiller ces mêmes systèmes
- Beaucoup de composants ne résistent pas aux contraintes environnementales sévères
- Les réseaux sans fil ne répondent pas, en l'état, au niveau de sécurité exigé.

On peut d'ores et déjà dresser une liste assez précise des verrous technologiques que l'on rencontrera lors de la conception de ce système. On peut déduire ces verrous technologiques d'une part des contraintes classiques du milieu aérospace de sécurité sûreté de fonctionnement fiabilité combiné à la situation inédite d'embarquer un réseau sans fil à bord d'un aéronef. Mais aussi aux standards de performance des systèmes qu'on cherche à remplacer et qu'il faudra au minimum atteindre.

Robustesse de transmission (tolérance aux perturbations) et fiabilité

Le milieu aéronautique et spatial est un milieu contraignant où le matériel est placé dans des conditions extrêmes de confinement, de vibration, de rayonnement, de température et de pression. Les modes de propagation induits par l'environnement aérospace diffèrent des modèles classiques du fait de ces contraintes. Cependant, pour la plupart des applications, l'intégrité du signal devra être garantie en permanence, voire en temps réel. **SAHARA propose de faire déboucher des technologies dédiées à ces environnements en complétant les études déjà menées par les précédents projets.**

Disponibilité de fréquences et compatibilité électromagnétique

Un aéronef est soumis à diverses sources d'ondes électromagnétiques capables de créer des interférences vis-à-vis d'un dispositif sans fil, qui lui-même ne doit pas perturber les autres systèmes de bord. De plus les réglementations nationales et l'ITU (Union Internationale des Télécommunications) restreignent les fréquences disponibles. **SAHARA sélectionnera des fréquences en adéquation avec toutes ces contraintes (ne pas être perturbé et ne pas perturber).**

Sécurité (intégrité, confidentialité, usurpation)

Les liaisons sans fil sont par nature sujettes à interception. SAHARA, en se basant sur la méthode d'analyse des scénarios possibles, sécurisera les communications sans fil pour les rendre utilisables pour un usage embarqué sur aéronef.

Communication sans fil sous contraintes de temps réel et d'énergie

Les protocoles de communication des capteurs devront intégrer des contraintes applicatives variées. Le respect de contraintes sur les temps de transmission de bout en bout des messages ainsi que le routage économe en énergie, pour des communications à plusieurs sauts, sont encore des problèmes largement non résolus en contexte sans fil. **On prendra soin, pour**

SAHARA, de rendre les protocoles utilisés les plus économes possible en énergie. On les adaptera de manière à leur faire respecter les contraintes temporelles.

Sources d'énergie

Le dispositif SAHARA est sans fil, ce qui implique que le capteur doit idéalement être alimenté indépendamment du réseau de bord, voire être totalement autonome. Il faudra disposer d'une source d'énergie (batterie, récupération d'énergie...) à la durée de vie compatible avec le besoin, en particulier en termes d'environnement thermique et maintenance. **SAHARA s'attachera à réduire la consommation de tous les composants mis en œuvre, mais ne développera pas de source d'énergie spécifique.** Les sources d'énergie et les technologies d'*energy harvesting* évoluent rapidement et les composants commerciaux dérivés de SAHARA utiliseront les meilleures sources d'énergie disponibles au moment de leur intégration sur un aéronef.

Le poids et la taille :

Tous les éléments devront être miniaturisés pour pouvoir s'adapter aux contraintes imposées par un environnement aérospatial, d'autant plus qu'on essaye bien ici de limiter le poids dû au câblage. **Il ne faudrait donc pas que le nouveau système pèse plus lourd que le système existant.**

La transmission

L'antenne devra être orientée de façon à émettre avec un minimum de réfraction. L'architecture de l'ensemble du système devra être pensée en ce sens. L'orientation de l'antenne devra aussi prendre en compte les interférences potentielles des émissions de l'avionique environnant et de l'environnement de l'aéronef. La fréquence d'émission devra être soigneusement choisie. Le canal de transmission devra être suffisamment sûr et le protocole devra être suffisamment sécurisé pour transporter des informations certes peu critiques (pour l'instant) mais appartenant au niveau D sur l'échelle de criticité

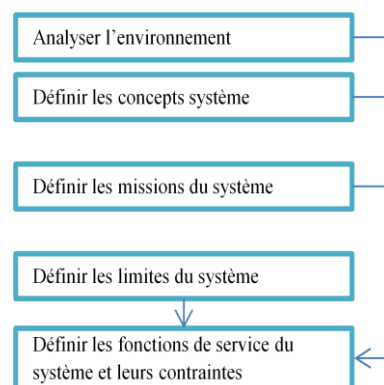
| Functional failure condition classification (AC 23.1309-1C, AC 25.1309-1A and ARP4754) | System development assurance level (ARP4754) |
|---|---|
| Catastrophic | Level A |
| Severe major/hazardous | Level B |
| Major | Level C |
| Minor | Level D |
| No Effect | Level E |

Nomenclature cross reference

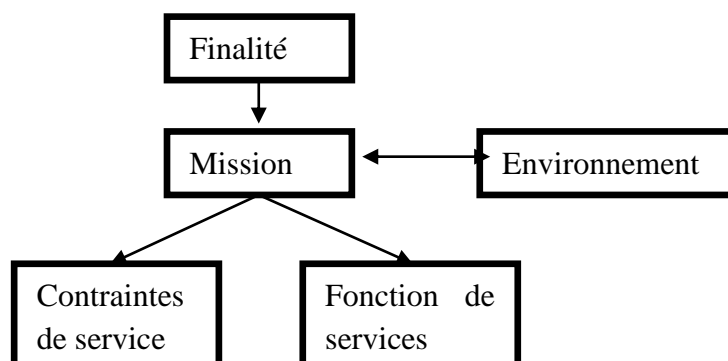
On bornera le système à l'existant que l'on conserve, ce qui veut dire que l'on garde les capteurs tels qu'ils sont, ils ne font pas partie du système que nous considérons. Un module de conversion du signal sera implémenté au besoin. Le système inclus donc le module d'analyse et le module de transmission. Le bus de communication étant déjà installé, il ne saura souffrir d'être modifié pour les besoins du système et n'en fait donc pas partie. Quand aux interfaces homme machine, elles n'ont pas à être innovantes même si de légères modifications seront requises pour interfacer SAHARA. La conception de l'intégralité du système préférera donc choisir une technologie sur étagère si besoin est.

3.4. Définition des fonctions de service du système et leurs contraintes

On a précédemment étudié les missions du système qui sont les buts et objectifs généraux que devra atteindre le système pour répondre à la finalité. On considère généralement que les missions opérationnelles du système comprennent des missions d'exploitation correspondant au service à rendre à l'environnement utilisateur (comme on l'a vu dans les différents scénarios opérationnelles : transmettre une information ou déclencher une alarme) et des missions de soutien logistique correspondant au maintien du système en état de rendre ces services. (Fiabilité, sûreté de fonctionnement)



Il s'agit là de déduire des missions du système les fonctions constituant les services à rendre par le système à son environnement ainsi que les contraintes (normes règles scenarii performances qui leur sont associées). Les fonctions de services correspondent aux actions attendues du système vis-à-vis de son environnement. Les contraintes de service constituent les conditions imposées à ces actions



[Meinadier01] chapitre 5

On distinguera d'une part les fonctions, et contraintes d'exploitation qui correspondent aux besoins de l'environnement utilisateur du système. Puis on regardera les fonctions et contraintes logistiques qui correspondent aux besoins de l'exploitation et du maintien du système en condition opérationnelles. Elles ont un impact d'une part sur le système opérant qui doit avoir des qualités de fiabilités maintenabilité et disponibilité, et, d'autre part, sur le système de soutien logistique assurant les approvisionnements, le ravitaillement et la maintenance.

Aux contraintes de service peuvent s'ajouter des contraintes organisationnelles ou physiques et parmi les contraintes on trouve la définition des interfaces des systèmes formant l'environnement auxquelles le système devra s'adapter

Fonction d'exploitation

- Transmettre une information sur l'environnement de l'aéronef sans fil
- Transmettre une information sur l'état de santé d'un aéronef sans fil
- Transmettre un signal d'alarme sans fil

Contraintes d'exploitation associées

- Garantir l'intégrité du canal de transmission
- Garantir la sécurité du protocole utilisé
- Garantir la sûreté de fonctionnement des modules du système
- Garantir l'intégrité des informations transmises
- Garantir un temps de transmission acceptable
- Limiter le nombre d'information à transmettre
- Garder en mémoire les informations non transmises utiles
- Garantir le déclenchement du signal d'alarme à juste titre

Fonction logistique

- Maintenir un service minimum en cas de panne du système et signaler la panne
- Faciliter la maintenance et l'installation du système
- Ne pas se laisser interférer ni créer d'interférence

Contraintes logistiques associées

- Définir un temps maximum d'indisponibilité
- Garantir la fiabilité des modules du système (limiter les pannes)
- Assurer la compatibilité électromagnétique avec l'environnement

Contrainte organisationnelle

- La maintenance est effectuée à espacement de temps précis et incompressible

Contrainte physique

- Propagation en milieu confiné architecture du système hôte relativement complexe

Conclusion de l'approche du système dans son contexte opérationnel : résumé des résultats précédents :

Définition de la finalité du système §2.1: On peut résumer l'intention réelle derrière le lancement du projet SAHARA pour la fabrication du système SAHARA à :

- Une meilleure connaissance de l'environnement et de la santé de l'aéronef (par l'installation du système dans des zones difficile d'accès ou déjà construite et pas démontable)
- Une réduction du poids (par une réduction du câblage donc du volume et du poids)
- Une réduction de la complexité (par une simplification du réseau et du matériel embarqué)
- Une augmentation de l'évolutivité (par la malléabilité due à la facilité d'implémentation)
- Une augmentation de la flexibilité (par la modularité due à l'architecture optimisée du système)
- Une augmentation de la fiabilité par la multiplication des redondances

Définition du concept du système SAHARA §2.5:

- Réseau de communication sans fil à bord d'un aéronef

Analyse de l'environnement du système SAHARA §2.7 :

- Un système dans un système :
- Environnement direct : aéronef (avion hélicoptère lanceur)
- Environnement indirect : environnement de l'aéronef (sol, vol, labo de conception, hangar)
- Parties prenantes :
- Système législatif
- Système ingénierie sociétal
- Système client/ utilisateur
- Système environnement
- Système technologique

Acteurs (Opérateur/utilisateurs/clients) :

- Pilote,
- Equipe de maintenance
- Equipe de conception

La mission « haut niveau » du système SAHARA §3.1 a été identifié comme:

- Un système chargé d'acheminer des données d'un point A : capteur à un point B : Bus)

Les scenarios opérationnels §3.1 :

- Scenario pilote dans un hélicoptère ou un avion avec des données normal ou anormal
- Scenario équipe de maintenance d'un hélicoptère ou d'un avion quand du matériel est détecté comme défaillant (contrôle de santé de l'aéronef)
- Scenario équipe de maintenance d'un lanceur quand du matériel est détecté comme défaillant (contrôle de santé du lanceur)
- Scenario équipe de conception d'un lanceur pour de la télémessure aidant à améliorer l'appareil

Ont fait apparaitre deux missions opérationnelles

- Le système SAHARA est chargé de rapporter des informations sur l'environnement et la santé de l'aéronef
- Le système SAHARA est chargé de déclencher une alarme en cas de besoin

Le système SAHARA inclut les modules §3.3:

- Traitement du signal
- Analyse
- Mémoire
- Emission/réception : les antennes protocole de communication par le canal électromagnétique sans fil
- Alarme
- Énergie

Le système SAHARA est borné

- D'un coté par les capteurs
- De l'autre par les bus aéronef

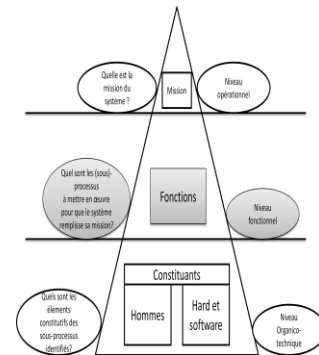
Les missions par modules :

- Recevoir des données physiques d'un capteur
- Traiter pour en faire un message transportable
- Analyser l'information et la comparer avec les valeurs standards
- Mémoriser, selon l'application et les besoins, l'information reçue
- Transmettre le message au centre de décision relié au Bus, interface entre SAHARA et l'aéronef
- Alarmer les utilisateurs direct (pilote, maintenance, concepteurs) si l'information diffère trop de la valeur standard attendue

4. Approche fonctionnelle en phase projet de conception d'un système innovant

L'analyse et le raffinement des fonctions de service et des contraintes associées conduisent à répertorier les exigences attendues du système. Les fonctions de service seront détaillées sous forme d'exigence fonctionnelles et les contraintes associées sous forme d'exigence de performance de ces fonctions.

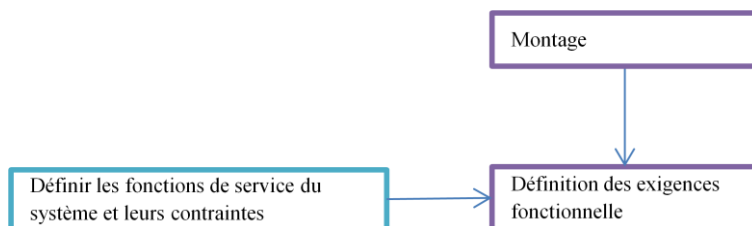
Pour rédiger une spécification d'exigence exhaustive rappelons qu'une cartographie détaillée de l'environnement du système faisant apparaître les parties prenantes a été réalisée au § 2.7 afin d'étudier le maximum de point de vue et de tenir compte des besoins et contrainte de chacun. Aussi on prendra comme point de repère cette cartographie pour établir une liste d'exigence en fonction des différents modules et points durs de ce projet.



4.1. Définition des exigences fonctionnelles

On prendra chaque fonction et on écrira une exigence de performance correspondante

Format exigence fonctionnelle : le système doit ... avec un niveau de performance...



SAHARA est un réseau de communication sans fil permettant d'acheminer des informations d'un capteur vers un Bus aéronautique et du Bus aéronautique vers un capteur.

La fonction la plus évidente mais la plus complexe est donc la transmission d'information si on veut la rendre sans fil pour tous les verrous technologiques et les contraintes aéronautiques que cela implique.

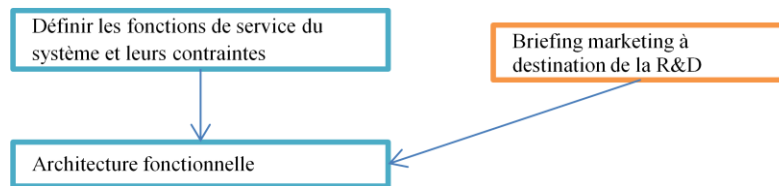
Cette information est traitée par le système SAHARA donc la fonction de traitement est aussi incluse

L'information est analysée par SAHARA afin d'envoyer si besoin un signal d'alarme cette fonction sera comprise dans le système

Cependant d'après les informations récoltées dans le chapitre 3, la fonction de capter le phénomène physique donnant lieu à l'information ne sera pas traitée dans le système SAHARA. La fonction d'alimenter les différents modules ne sera pas traitée non plus quand au centre de décision la fonction d'affichage ne fera pas partie des fonctions étudiées et soulevée dans cette spécification d'exigence.

4.2. Analyse et conception fonctionnelle : architecture fonctionnelle

On décompose les fonctions en sous fonctions unitaires et on combine les chaines fonctionnelles en un réseau de sous fonctions constituant l'architecture fonctionnelle.



On a pris ici comme point de départ : La fonction de captage qui même si elle ne fait pas parti du système SAHARA est la fonction d'entrée de notre système, la fonction de transport d'information sur l'environnement ou sur la santé de l'aéronef et la fonction de traitement

Puis on a raffiné chacune de ces fonctions de base et on a créé une architecture fonctionnelle dont voici le détail (cette architecture est une des architectures possibles c'est celle que nous avons pourtant choisi pour répondre au mieux aux besoins)

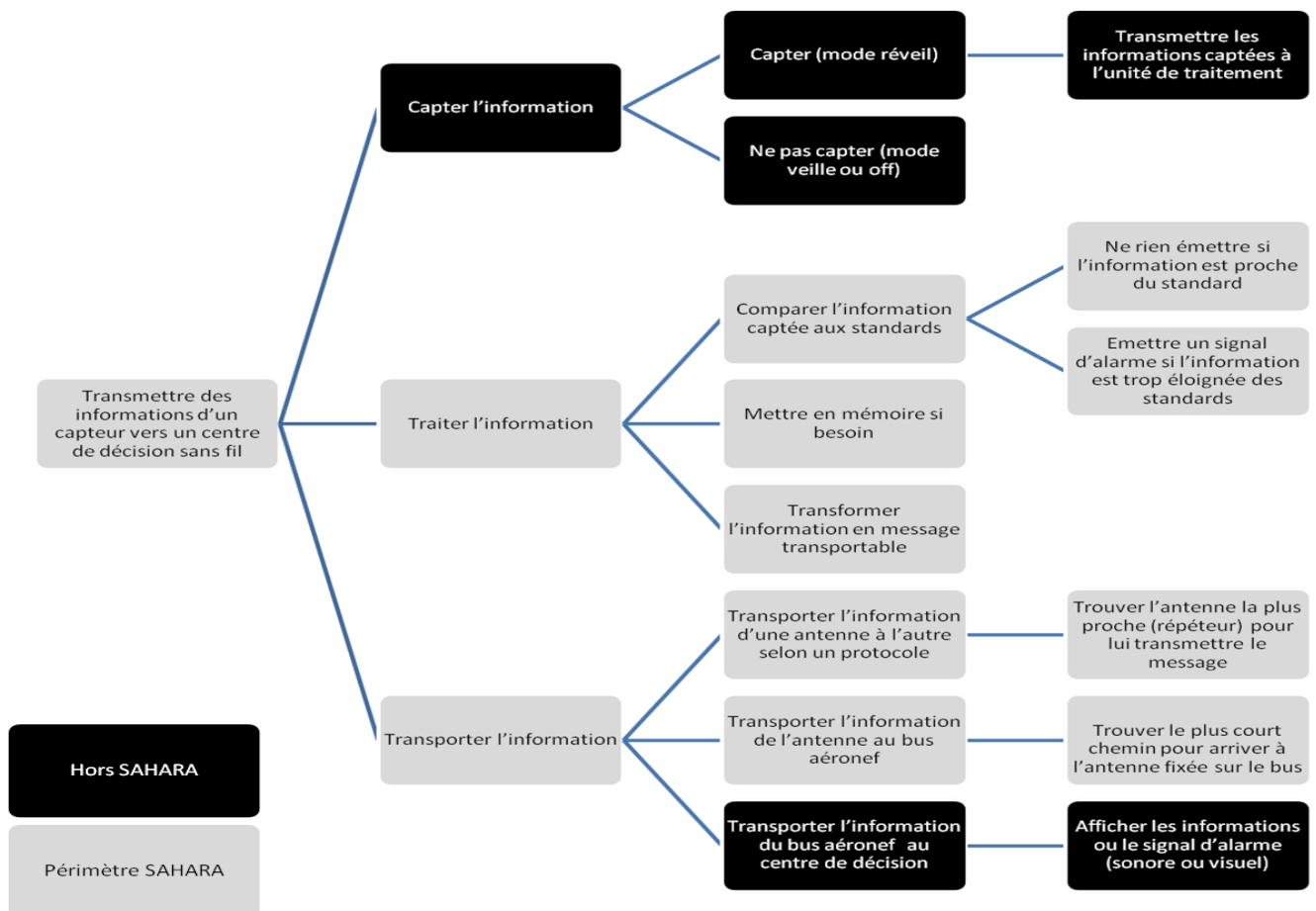
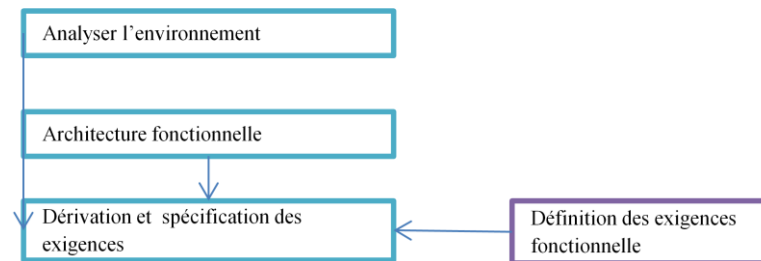


Figure 32 : découpage fonctionnel

4.3. Analyse et dérivation des exigences de haut niveau

Analyse et spécification des exigences

- On prendra chaque besoin et on l'exprimera sous forme d'exigence
- On prendra chaque contrainte environnementale et on l'écrit sous forme d'exigence
- Format exigence environnementale: le système doit supporter...(ou ne doit pas influencer sur...)
- Format exigence besoin : le système doit...
- On réunira dans un même document toutes les exigences et on les classera par ordre de priorité, on recommandera une (ou plusieurs) technologie de notre portefeuille en fonction des critères de sélection qui ressortiront de cette spécification d'exigence.



4.3.1. Caractéristique d'une bonne spécification d'exigences

Les exigences qu'on spécifiera devront décrire ce que le système devra faire et de quelle manière il exécute ses fonctions. L'ensemble des exigences définiront les caractéristiques ou propriétés du système désiré. On évitera bien sûr de spécifier *la manière* pour le système de mettre en œuvre ces exigences et on laissera ce genre de décision pour les activités de conception.

Les exigences sont notoirement difficiles à présenter à un niveau idéal. On doit être capables d'exprimer des exigences fonctionnelles d'une façon qui soit facilement interprétable dans les caractéristiques de conception du système.

Nécessaires – Elles doivent porter sur des éléments nécessaires, c'est-à-dire des éléments importants du système que d'autres composants du système ne pourraient pas compenser.

Non ambiguës – Elles doivent être susceptibles de n'avoir qu'une seule interprétation.

Concises – Elles doivent être énoncées dans un langage qui soit précis, bref, et communiquant l'essence de ce qui est exigé.

Cohérentes – Elles ne doivent pas contredire d'autres exigences établies, ni être contredites par d'autres exigences. De plus, elles doivent, d'un énoncé d'exigence au suivant, utiliser des termes et un langage qui signifie la même chose.

Complètes – Elles doivent être énoncées entièrement en un endroit et d'une façon qui ne force pas le lecteur à regarder un texte supplémentaire pour savoir ce que l'exigence signifie.

Accessibles – Elles doivent être réalistes quant à aux moyens mis en œuvre en termes d'argent disponible, avec les ressources disponibles, dans le temps disponible.

Classable – on attribuera à chaque exigence un niveau d'importance

Vérifiables – Elles doivent permettre de déterminer si elles ont été atteintes ou non selon l'une de quatre méthodes possibles : inspection, analyse, démonstration, ou test.

Modifiables et Retractable – on renseignera la partie prenante responsable de l'exigence, on lui attribuera une codification logique

A ne pas confondre :

- Exigences fonctionnelles - Elles décrivent les caractéristiques du système ou des processus que le système doit exécuter.
- Exigences non fonctionnelles - Elles décrivent les propriétés que le système doit avoir exemple type consommation énergétique etc... (On s'y intéressera de manière secondaire dans SAHARA car on ne cherche qu'à atteindre un TRL5-6)
- Contraintes- Les limites du développement du système

4.3.2. Exigence de haut niveau des différentes parties prenantes

Rappelons ici les différents groupes de parties prenantes dont les exigences devront être prises en compte par le système SAHARA.

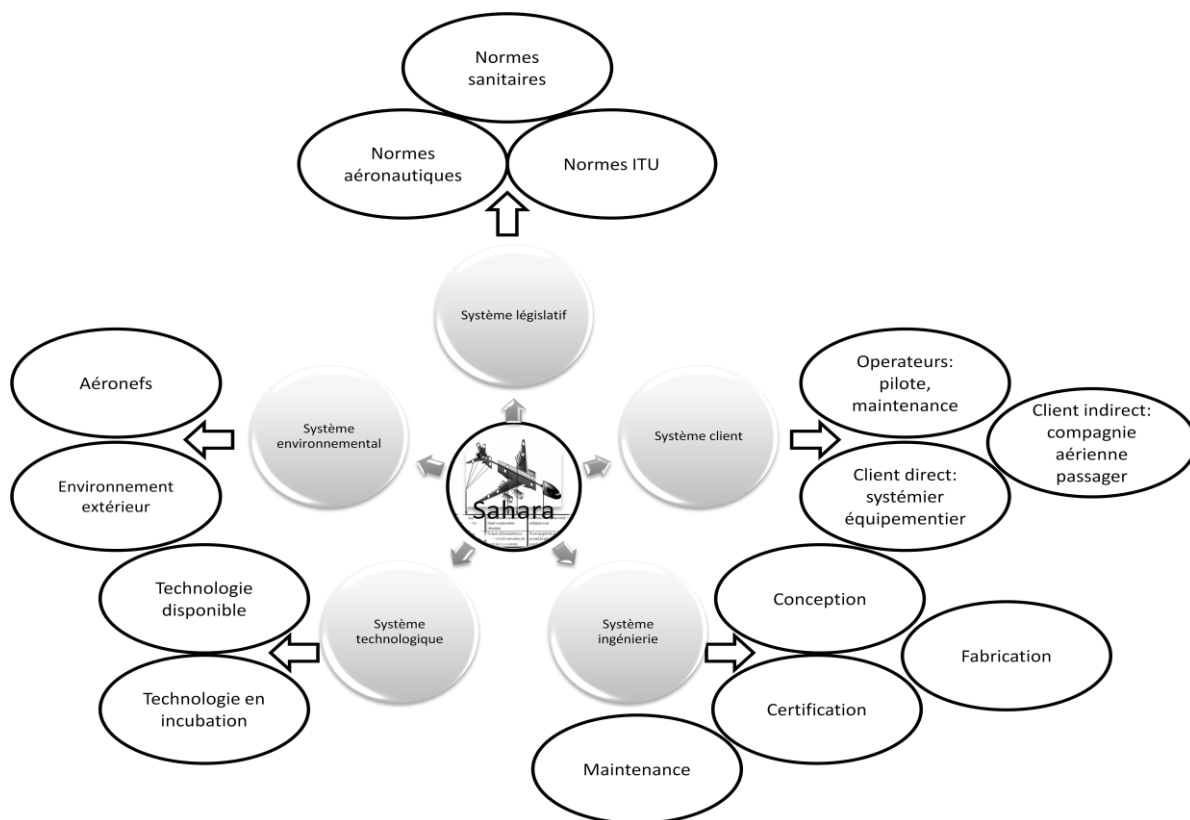


Figure 33 : groupe et sous groupe de parties prenantes

Dans le paragraphe qui suit, on a pris le soin d'interroger les responsables des parties prenantes citées au dessus et de recueillir leurs exigences haut niveau.

Pour ce qui concerne le système environnemental, Eurocopter Astrium et SAFRAN (pour la partie avion) se sont exprimés et les deux exigences qui en sont ressorties sont :

REQ.HN.1 : Exigence aéronef : le système ne doit pas perturber et ne doit pas être perturbé par l'avionique

REQ.HN.2 : Exigence environnement : ne pas être perturbé par l'environnement de l'aéronef

Pour ce qui concerne le système technologique, les laboratoires membres du consortium du projet SAHARA (l'école centrale d'électronique, l'INRIA, le CNES et le LIMOS) se sont exprimés et les deux exigences qui en sont ressorties sont :

REQ.HN. 3 : Exigence technologie disponible : le système devra intégrer un maximum de technologie disponible pouvant être modifiée

REQ.HN.4 : Exigence technologie en incubation : le système devra justifier le bon fonctionnement global s'il intègre des technologies en incubation

Pour les aspects ingénierie système les équipes de maintenance ont été interrogés ainsi que les intégrateurs (dont SAFRAN qui fait aussi parti du consortium du projet), les quatre exigences suivantes ont été identifiées

REQ.HN.5 : Exigence maintenance : le système devra raccourcir ou au moins ne pas allonger le temps de maintenance ni complexifier celle-ci

REQ.HN.6 : Exigence certification : le système devra être certifiable

REQ.HN.7 : Exigence conception : le système devra être conçu avec les moyens de l'équipe de conception

REQ.HN.8 : Exigence fabrication : Le système devra être fabricable pendant une durée de 30 ans et l'intégration du système ne devra pas recourir à des outils spécifique et complexe

Pour obtenir les exigences clients, on a pris en compte les intégrateurs, et on a repris les demandes classiques des compagnies aériennes faites aux constructeurs. Les exigences retrouvées sont les suivantes :

REQ.HN.9 : Exigence Client direct : le système devra atteindre les performances exigées par le client

REQ.HN.9.1 : Le système devra faire gagner du temps, de la malléabilité et de l'argent au client direct

REQ.HN.9.2 : Le système devra être fiable sure et sécurisé

REQ.HN.10 : Exigence client indirect : le système ne devra pas déranger le client indirect

Pour ce qui est des exigences opérateurs on a interrogé les équipes de maintenance, les pilotes (avion et hélicoptère) et les équipes de conception de lanceur chez Astrium

REQ.HN.11 : Exigence opérateur :

REQ.HN.11.1 : Le système devra acheminer des informations vers les opérateurs

REQ.HN.11.2 : Le système devra alarmer l'opérateur si besoin

REQ.HN.11.3 : Le système devra répondre aux demandes de l'opérateur

Pour les exigences des normes, on a répertorié toutes celles qui pourraient impacter sur le système SAHARA, on s'est procuré celles qui étaient gratuites et on a acheté les normes payantes (type DO160)

REQ.HN.12 : Exigence normes ITU : le système devra respecter les normes ITU

REQ.HN.13 : Exigence normes aéronautique : le système devra respecter les normes aéronautiques

REQ.HN.14 : Exigence normes sanitaires : le système devra respecter les normes sanitaires

Pour la suite de l'étude on a dérivé les exigences des parties prenantes sur le système afin d'obtenir les exigences fonctionnelles et organiques relatives à celles-ci. Vous pourrez trouver la dérivation détaillée en annexe 5

On remarque en dérivant les exigences de haut niveau que plusieurs exigences se répètent et qu'un plan du système se dessine naturellement sur les exigences fonctionnelles et organiques. Il se divise sur les différents modules déjà identifiés antérieurement. On relève aussi que les exigences fonctionnelles et organiques ne couvrent pas intégralement la spécification d'exigences. En effet on constate qu'il est nécessaire d'y ajouter les exigences projets qui ne sont ni des exigences fonctionnelles, ni des exigences organiques mais qu'il est primordial de voir figurer dans la spécification d'exigence. On a reclassé les exigences par groupes. Voici les groupes qui apparaissent suite à la dérivation.

- Exigences projet
- Exigences fonctionnelles et organiques
 - Générales
 - Architecture physique
 - Modes
 - Communication / protocole
 - Liaison RF
 - Mémoire
 - Gestion des pannes et maintenance
 - Énergie
 - Générales
 - Interface de type A : Capteurs et actionneurs

- Interface de type B : Réseau de bord
- Interfaces de type C : Moyens d'essai
- Dimensions terminaux, routeurs et concentrateurs
- Matériel
- Plateformes d'essais et environnement des démonstrateurs.

Vous pourrez trouver en **annexe 6** le tableau de traçabilité qui a permis de classer les exigences dérivées en grands groupes d'exigences (susmentionnés). On a pris le soin d'éliminer les répétitions. Pour plus de facilité de lecture, lorsque deux exigences sur le même sujet étaient différentes, on a gardé l'exigence la plus contraignante (qui peut le plus peut le moins). Dans le cas où une exigence est trop contraignante et n'est pas entièrement couverte, il sera toujours temps de reprendre l'exigence moins contraignante (grâce au tableau de traçabilité) et tenter de couvrir celle-ci afin de répondre au moins à l'un des besoins.

Dans notre cas, les exigences les plus contraignantes sont souvent les exigences avion. Si, par exemple, on ne parvient pas à faire en sorte que le système ait une autonomie de 10h, peut-être que 5h suffirait pour un hélicoptère.

4.4. Spécification des exigences

Maintenant que les groupes d'exigences sont bien définis il est nécessaire de spécifier et de justifier chaque exigence. Pour les besoins du projet SAHARA, une spécification des exigences aussi complète que possible a été réalisée par nos soins (avec le concours de tous nos interlocuteurs du consortium projet). Cette spécification a été validée par les parties prenantes et fait partie des éléments contractuels de l'accord de consortium. Dans ce sous chapitre sont exposés quelques exemples choisis d'exigences tirées de cette spécification où nous avons repris point par point les grands groupes identifiés et explicité les exigences relatives à chaque groupe. Ces exigences sont tirées directement ou découlent des normes

- [EUROCAE ED-12B / RTCA DO-178C]
- [EUROCAE ED-14E / RTCA DO-160F]
- [EUROCAE ED-80 / RTCA DO-254]
- [SPX 902 A002 E01-F]
- [SPX240AV001E99]
- [TNX 001 AE009 E01]

Vous trouverez un résumé plus complet (où n'apparaissent pas les exigences confidentielles d'Eurocopter et d'Astrium) en **annexe 7**.

4.4.1. Exigences projet

Dans un premier temps penchons nous sur les exigences générales qui peuvent s'appliquer à tous types de projet.

REQ.PROJ.1 : Interprétation des exigences : afin d'éviter tout malentendu ou interprétation faussée de cette spécification d'exigence, les concepteurs s'engagent à consulter les utilisateurs finaux en cas de doutes.

REQ.PROJ.2 : Justification des exigences : En réponse aux exigences émises par les utilisateurs finaux, les solutions, les choix techniques et technologiques, retenus par les responsables en charge de l'étude des démonstrateurs devront au minimum être détaillés dans un dossier contenant le plan de développement et un dossier de justification des choix techniques et technologiques permettant d'assurer le respect des exigences.

REQ.PROJ.3 : Produit compétitif : Il est essentiel, afin d'avoir un prix final compétitif, que les réponses soumises par les concepteurs fassent mention des exigences techniques qui influencent le plus le cout total, qu'il s'agisse de matières premières, de développement du produit, ou de production de masse.

REQ.PROJ.4 : Solution alternative : Lorsque les concepteurs proposent une solution alternative pour satisfaire certaines des exigences, elles devront fournir aussi les preuves démontrant le bien fondé de ces changements.

REQ.PROJ.5 : Respect des exigences : Les concepteurs devront apporter la preuve que les exigences ont toutes bien été respectées, ou fournir un état précis de la couverture partielle d'une exigence et l'impact fonctionnel associé.

REQ.PROJ.6: Vérification des exigences : Les concepteurs devront établir une matrice de traçabilité et de couverture des exigences énoncées dans le présent document. Les écarts et dérogations devront être soumis à l'approbation des utilisateurs finaux. De même, l'impact de non respect d'une exigence sur d'autres exigences devra être clairement identifié.

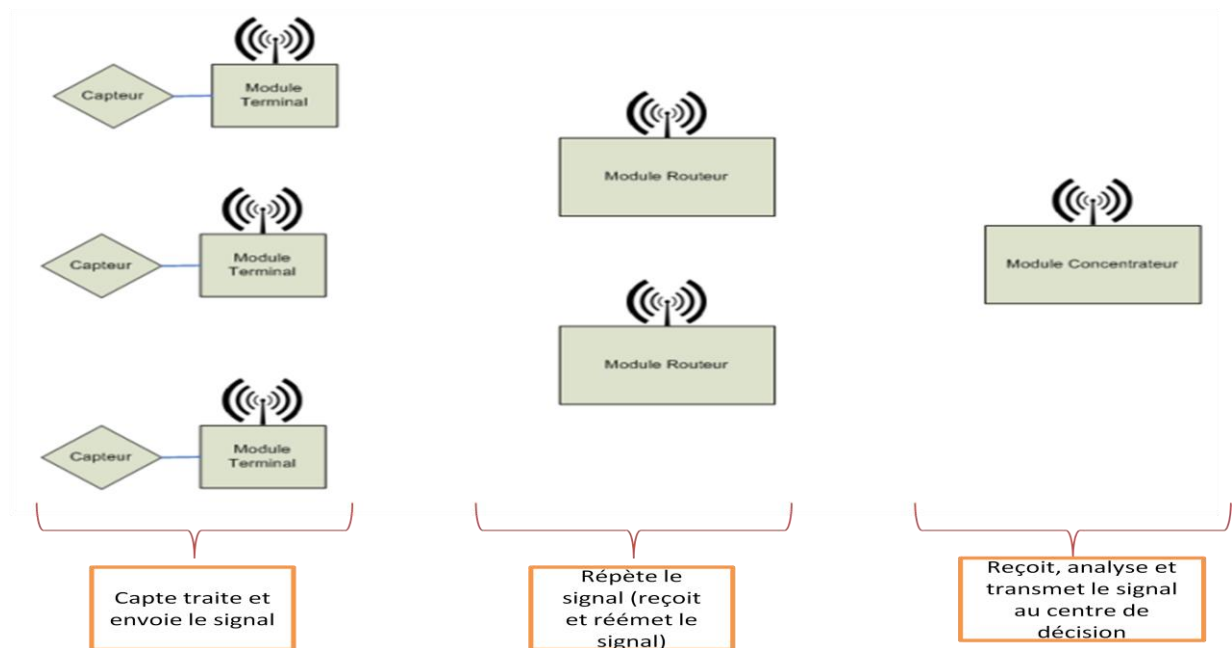
REQ.PROJ.7 : Plan de validation des exigences : Les tests nécessaires à la vérification de la conception du démonstrateur doivent assurer la validation de l'ensemble des exigences. Un document devra être rédigé afin de détailler comment chaque exigence sera vérifiée : tests, simulation analyses, revues formelles, expériences, analogie...

REQ.PROJ.8 : Faisabilité du démonstrateur : Si une exigence n'est pas réalisable dans le temps et le budget défini par le projet, après accord des utilisateurs finaux, les concepteurs doivent être à même de garantir l'industrialisation d'un produit répondant aux exigences, exemple : l'emploi de composant grand public pour le démonstrateur avec un équivalent compatible de l'environnement final pour la solution industrielle. Ce critère est applicable aux composants matériels et logiciels des produits développés.

4.4.2. Exigences fonctionnelles et organiques

4.4.2.1. Point glossaire :

Ci-dessous les différents modules constituant le système SAHARA



Pour plus de clarté le vocabulaire utilisé dans la spécification des exigences a été figé comme suit :

Module : Constituant unitaire du système (dans notre cas Concentrateur, Routeur ou Terminaison.).

Capteur : Élément passif ou actif permettant de convertir une grandeur physique en information compatible de l'entrée d'un nœud (ou d'un concentrateur).

Terminal : Satellite autonome disposant d'une liaison RF avec un ou des modules et disposant d'une ou plusieurs interfaces capteur.

Routeur : Élément concentrant les informations d'une ou plusieurs terminaisons (par une liaison RF), disposant ou pas disposant d'une ou plusieurs interfaces capteur. Mais ne disposant pas de raccord avec le système hôte.

Concentrateur : Élément concentrant les informations d'une ou plusieurs terminaisons (par une liaison RF), disposant ou pas disposant d'une ou plusieurs interfaces capteur et raccordé au système hôte : apport énergétique et liaisons de communication.

4.4.2.2. Générales

REQ.GE.1 : Perte dynamique d'un terminal : Si durant la phase d'exploitation un terminal vient à ne plus répondre, ce dernier pourra être réintégré au système suivant la procédure d'identification dynamique d'un terminal. La mise en œuvre de cette fonctionnalité est conditionnée par une analyse système aéronef (sécurité, sûreté, ...).

REQ.GE.2 : Mise en mode « marche »/ « sommeil » du système SAHARA via le concentrateur. Un moyen de mise en mode marche et mode sommeil du système SAHARA sera accessible via le concentrateur. Ce moyen (bouton, interface discrète...) sera défini en accord avec les utilisateurs finaux.

REQ.GE.3 : Réinitialisation du système à froid : Cette exigence porte sur le concentrateur, unique entité connectée au réseau bord d'alimentation du système hôte. Dès lors que l'alimentation parvient au concentrateur, il doit dérouler sa procédure de test d'intégrité puis attendre une requête spécifique du système hôte pour effectuer le contrôle de présence des terminaux qui lui sont affectés. A l'issue de cette phase de contrôle le concentrateur doit être en capacité de fournir au système hôte un état global (présence, absence des terminaux, ...).

4.4.2.3. Architecture physique

REQ.AR.1 : Remplacement d'un module : Chaque module devra être composé d'un seul bloc afin qu'il soit remplaçable en quelques minutes. L'ajustement ou la calibration d'un module capteur après son installation ou son remplacement doit-être évité.

REQ.AR.2 : Fixation des modules : Un terminal doit présenter une interface de fixation ne nécessitant pas de vis/écrou/perçage. De la colle ou du velcro doivent suffire, le but est de simplifier les opérations et les risques de perte d'objets dans des zones peu accessibles. Ce moyen de fixation est à mettre en regard avec la masse du module et les ambiances mécaniques.

REQ.AR.3 : Distance de transmission des données entre le capteur et le terminal : La distance de transmission des données entre le capteur et le terminal est inférieure à 2 m. Le capteur numérique, source des données à transmettre, peut être distant du module de communication pour des raisons d'accessibilité ou d'ambiances sévères.

4.4.2.4. Modes

REQ.MOD.1 : Mise en sommeil des terminaux en phase « transport, stockage » : Les terminaux sont mis en mode sommeil sur ordre des concentrateurs du système SAHARA.

REQ.MOD.2 : Durée de mise en sommeil des terminaux en phase « transport, stockage » : Le réveil d'un système SAHARA est programmable pour une durée comprise entre 1 min et 1 heure.

REQ.MOD.3 : Mode « écoute » lors de la phase « transport, stockage » : Pendant la phase de transport les terminaux sont en mode sommeil, les terminaux se mettent périodiquement en mode « écoute », sans autre fonction active, pendant 5 minutes. En mode « écoute », les terminaux peuvent recevoir et exécuter un signal de réveil de la part du concentrateur gérant le réseau ou le sous-réseau considéré.

Nota : Les 5 minutes sont à confirmer suivant le bilan énergétique, et la durée max du processus de réveil d'un réseau.

4.4.2.5. Communication / protocole

REQ.COM.1 : Identification de la version du logiciel des modules : Pour chaque module, il doit être possible d'accéder à la référence du logiciel.

REQ.COM.2 : Protection de la programmation : (REQ.HN.1) Les règles suivantes de protection lors de la programmation doivent être prises en compte, le logiciel ne doit pas générer par lui-même des actions non-désirés et/ou non planifiées, l'exécution hasardeuse ou inappropriée du logiciel ne doit pas créer de panne matérielle.

REQ.COM.3 : Transfert des informations de configuration en phase de déstockage : Le système SAHARA permet de transférer des informations de configuration de et vers le capteur. Taille des informations : jusqu'à 100 ko.

Justification : les données propres au terminal choisis, en provenance d'une base de données ou, si ces données sont déjà dans le terminal, vers la base de données de mesure.

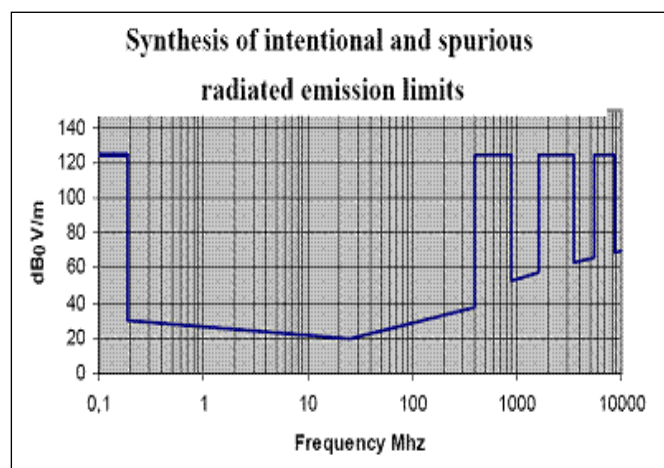
4.4.2.6. Liaison RF

REQ.RF.1 : Fréquences RF : (REQ.HN.4) Le projet SAHARA s'appuyant sur les normes IEEE 802.11 et IEEE 802.15.4, Les fréquences mises en œuvre seront celles recommandées par ces normes. Néanmoins les Laboratoires peuvent proposer d'étudier des bandes de fréquences différentes, pour mieux répondre aux contraintes des aéronefs.

REQ.RF.2 : Résistance aux perturbations RF : (REQ.HN.1) Le produit développé dans le cadre du projet devra être capable de résister à des perturbations RF, notamment celles de la bande ISM. Que ce brouillage soit intentionnel ou qu'il provienne d'un émetteur parasite à proximité.

REQ.RF.3 : Gabarit spectral d'émission : En termes de puissance, les émissions RF doivent respecter les exigences ci-dessous :

| | Frequency |
|--------|---------------------------|
| BAND 1 | < 190 kHz |
| BAND 2 | 470-840 MHz / 860-900 MHz |
| BAND 3 | 1.8 – 3.5 GHz |
| BAND 4 | 5.5 – 8.5 GHz |



Les 4 bandes spécifiques de la courbe identifie les bandes fréquentielles dans lesquelles il n'y a pas de récepteur pour une application civile (on ne considère pas en première approche les cas particuliers des Hélicoptères militaires). Ainsi, dans ces bandes, on peut relaxer la contrainte d'émission rayonnée imposée dans le tableau ci-dessus en autorisant une puissance maximale de 100mW.

Cette puissance de 100 mW se traduit par un champ de 120dB μ V/m mesuré à un mètre, en prenant comme hypothèse une émission omnidirectionnelle.

REQ.RF.4 : Respect des réglementations sur les systèmes RF : (REQ.HN.14) Les émetteurs doivent répondre aux exigences spécifiques provenant des organismes internationaux (ITU, FCC, ERC) qui réglementent toute émission.

4.4.2.7. Mémoire

REQ.MEM.1 : Réserve de mémoire : La capacité des mémoires internes des modules devra être dimensionnée afin de permettre une réserve d'au minimum 50% de la capacité globale.

Cette exigence s'applique à tout type de mémoire (vive, morte, reprogrammable) composant des systèmes programmables inclus (FPGA, ASIC, ...).

REQ.MEM.2 : Réserve pour code téléchargeable : La capacité des mémoires hébergeant le code exécutable et téléchargeable doit être au minimum de deux fois la taille de l'exécutable (en version finale : TRL5+) plus la réserve de 50%.

REQ.MEM.3 : Sauvegarde paramètres systèmes : Le système doit pouvoir, hors liens usines, recevoir et sauvegarder en mémoire des paramètres systèmes de : calibration, coefficients des lois de conversion, configuration réseau...

4.4.2.8. Gestion des pannes et maintenance

REQ.PAN.1 : Altération du matériel par le logiciel : (REQ.HN.1) Le logiciel ne doit pas altérer la tolérance aux pannes du matériel.

Auto Tests (Built-in Test Equipment): le système SAHARA doit avoir la capacité de s'auto contrôler afin d'identifier les modules, les connexions, les mémoires etc. défectueux ou inversement d'apporter l'information que le système SAHARA est à son fonctionnement nominal. Le résultat de ces contrôles devra être mémorisé pour une exploitation ultérieure.

REQ.PAN.2 : Cas des redondances : L'ensemble des redondances, s'il y en a, devront être testables.

REQ.PAN.3 : Logiciel de configuration / maintenance : Un logiciel permettant la configuration des modules et le diagnostic du système SAHARA devra être fourni. Le logiciel du système SAHARA permettra de lire en temps réel les données provenant des modules. L'IHM sera définie en accord avec les utilisateurs finaux.

De manière générale le logiciel pourra être utilisé au sol mais également en vol lors des phases d'essais du système. On sera alors dans un cadre de validation en vol du système.

4.4.2.9. *Energie*

Bien qu'on ait choisi de ne pas traiter en profondeur les problématiques d'alimentation, on sait que cette problématique restera un verrou technologique incontournable. C'est la raison pour laquelle dans ce projet on essaiera d'avoir un maximum d'informations sur le sujet pour un prochain projet dédié à cet aspect et d'optimiser au mieux la consommation du système SAHARA.

REQ.ENE.1 : Présence de tension : Un moyen simple doit permettre d'identifier si chaque élément composant SAHARA est sous tension ou non.

REQ.ENE.2 : Alimentation avant intégration : Le terminal peut être alimenté de l'extérieur par une liaison filaire.

Nota : Cette exigence fait référence à l'utilisation du terminal avant son intégration sur le lanceur. Celui-ci peut donc être alimenté, manipulé et même testé en laboratoire avant intégration.

REQ.ENE.3 : Caractérisation de la consommation : Les caractéristiques de consommation devront faire l'objet d'une attention particulière au cours du projet (Consommation max/min, Priorité d'alimentation, consommations des différentes fonctions etc..). Un bilan de consommation par fonctionnalité et mode opérationnel devra être remis par les concepteurs.

4.4.2.10. *Interfaces du réseau SAHARA*

4.4.2.10.1. *Générales*

REQ.INT.GE.1 : Désactivation du système SAHARA : La désactivation d'un système SAHARA devra être possible en moins de 5 minutes. Un ordre du système hôte doit permettre cette désactivation/réactivation.

REQ.INT.GE.2 : Connectique avec l'environnement : La nature de l'interface physique (connectique) entre les modules et les environnements d'intégration sera du type bornier pour les interfaces capteurs (analogique et/ou numérique) et RJ45 ou SUBD pour la sortie bus. La connectique pour les alimentations externes sera aussi du type bornier.

4.4.2.10.2. *Interface de type A : Capteurs et actionneurs*

REQ.INT.A.1 : Compatibilité avec les capteurs aéronautiques : Le système devra être suffisamment modulaire afin de s'adapter au plus grand nombre de capteurs actuels et préparer la compatibilité avec la future génération de capteurs (conditionnement de signaux modulaire).

REQ.INT.A.2 : Interface capteur de type 0-5VDC : Le module s'interfacera avec des capteurs à sortie analogique de type tension 0/5VDC.

4.4.2.10.3. *Interface de type B : Réseau de bord*

REQ.INT.B.1 : Alimentation du concentrateur et du routeur : L'alimentation du concentrateur et éventuellement du routeur, dans le cas où il serait connecté réseau bord, devra supporter les perturbations du réseau 28VDC présentes sur l'aéronef.

4.4.2.10.4. Interfaces de type C : Moyens d'essai

REQ.INT.C.1 : Interface de communication de test : L'interface de communication entre le concentrateur et le reste de l'avionique ou les moyens de tests SAHARA par une liaison du type Ethernet et/ou RS422/232. Cette interface n'étant pas le cœur du projet mais est essentielle à la bonne « testabilité » de l'ensemble du système SAHARA (réseau de modules et de concentrateurs). Toutes les caractéristiques des signaux, des protocoles de communication et des interfaces logicielles seront décrites dans un document de contrôle d'interface.

REQ.INT.C.2 : Interfaces de mise au point : Pour le démonstrateur, il faut ajouter une interface permettant de solliciter le système et de recueillir des informations sur son état de fonctionnement : mise au point, retour des données, etc.

4.4.2.11. Dimensions terminaux, routeurs et concentrateurs

REQ.DIM.1 : Volume : La fonctionnalité SAHARA intégrée aux terminaux aura un volume inférieur à 10 cm³ afin de disposer d'une solution plus concurrentielle que celles disponibles à la fin du projet.

REQ.DIM.2 : Masse : La fonctionnalité SAHARA intégrée aux terminaux devra être d'une masse inférieure à 20 g afin de disposer d'une solution plus concurrentielle que celles disponibles à la fin du projet.

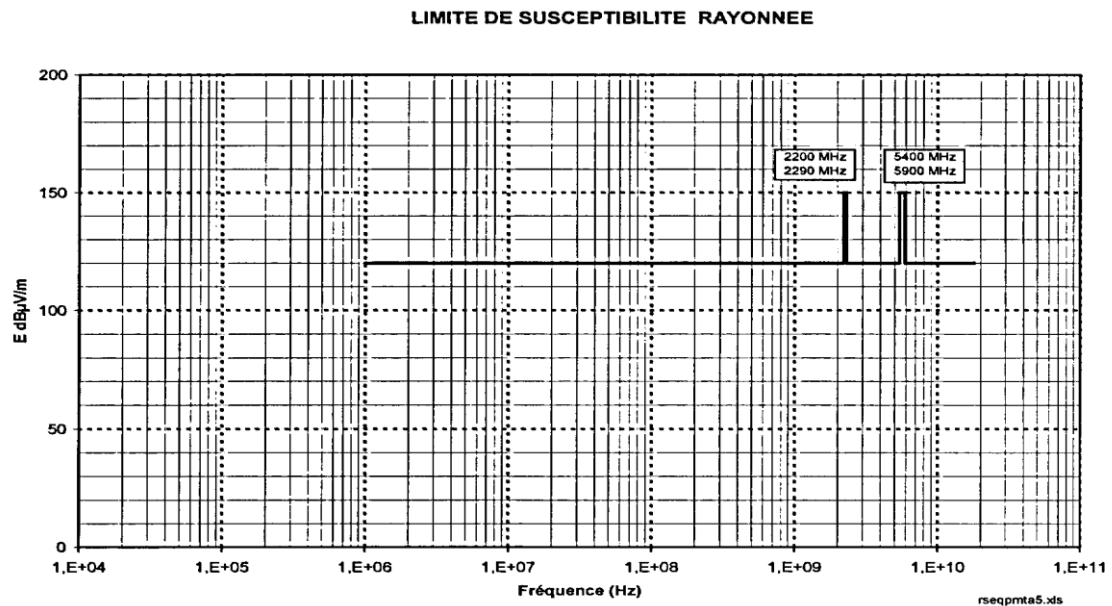
4.4.2.12. Matériel

REQ.MAT.1 : RoHS : Les procédés utilisés pour la conception de la carte doivent permettre une fabrication mixte ou compatible ROHS.

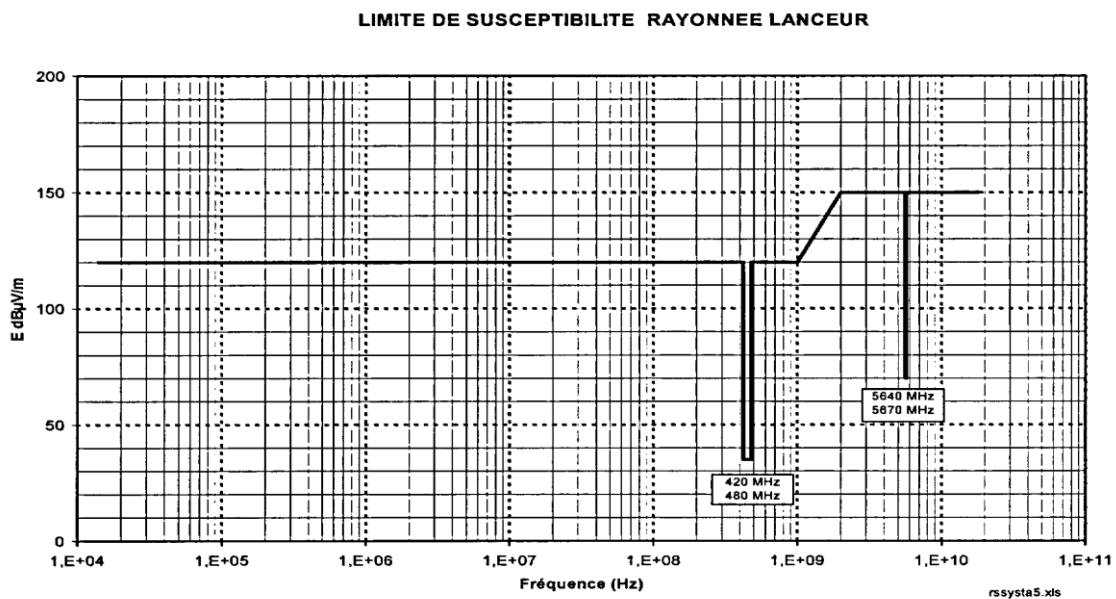
REQ.MAT.2 : JTAG : L'utilisation de composants ayant des fonctionnalités JTAG doit être privilégiée.

4.4.2.13. Plateformes d'essais et environnement des démonstrateurs.

REQ.ENV.1 : Susceptibilité rayonnée :



REQ.ENV.2: Susceptibilité en induit



REQ.ENV.3 : Perturbation environnemental : L'installation du système SAHARA ne devra pas affecter le fonctionnement des systèmes environnants.

Le système SAHARA n'est peut-être pas critique mais son environnement peut l'être

5. Amorce d'une approche organique en phase projet de conception d'un système innovant

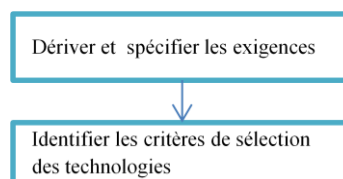
Maintenant qu'on a défini :

- Une architecture fonctionnelle (§4.2)
- L'ensemble des exigences des parties prenantes (§4.3.2)
- Les exigences dérivées des exigences des parties prenantes, qui constitue l'ensemble de la spécification des exigences, et dont on a souligné les exigences fonctionnelles en les regroupant par élément fonctionnel (§4.4.2)

On évoquera les différentes architectures organiques relatives aux architectures fonctionnelles citées dans le précédent chapitre qui répondent aux exigences fonctionnelles en dressant la liste des solutions que l'on a trouvées pour les verrous technologiques soulevés (§3.3.3).

5.1. Verrous technologiques et critères de sélection des technologies

Lors de la spécification d'exigence on a choisi un éventail restreint de technologies. On regardera quelles exigences n'était pas respectées par celles-ci (verrous technologique) et on tentera de les modifier en franchissant ainsi le gap technologique et en fournissant l'effort d'innovation requis pour réaliser un système viable.



Le but dans cette étape est de dresser la liste des verrous technologique, et ainsi de sélectionner les technologies les plus adéquates (dernière sélection) et de proposer des améliorations

5.1.1. Verrous technologiques :

On rappelle les 4 grands verrous technologiques qu'on a identifié aux étapes précédentes en précisant pour chaque couche les problèmes qui risquent de se poser et ce qu'il est possible de faire pour lever ces verrous:

Robustesse et Fiabilité

- ✓ Couche Physique :
 - Modulation standard
 - Modulation rendue robuste en radio logicielle
- ✓ Couche MAC :
 - Réduire les collisions : Déterminisme
 - Eviter les perturbations : Multi-Canal
 - Eviter les pertes : accusé de réception et Retransmissions
- ✓ Couche Réseau :
 - Eviter les mauvais liens : Routage
 - Tolérer les défaillances des nœuds et des liens : Routage adaptatif

Disponibilité fréquentielle et Compatibilité électromagnétique (annexe 8 : étude de la bande de fréquence)

✓ Couche MAC :

- Éviter les fréquences brouillées ou déjà utilisées : Accès Multi-Canal
- Cohabitation des différentes technologies utilisées

Sécurité (annexe 9 : étude sécurité)

- Étudier les scénarios d'intrusions possibles

Temps réel et Energie

✓ Couche MAC :

- Assurer des bornes d'acheminement des messages : Déterminisme et Différenciation de services
- Ordonnancer les périodes d'activité des nœuds : Duty Cycle, Réveil Forcé

✓ Couche Réseau :

- Assurer des bornes d'acheminement des messages de bout en bout : Déterminisme et Différenciation de services
- Construire des routes économes en énergie : Routage

5.1.2. Critères problématiques

Rappelons les différents types d'exigences vues au chapitre précédant et projetons celles-ci en termes de critères problématiques rencontrés

- Les exigences projet, générales, mémoires, matérielles, ne posent pas de réel problèmes technologiques elles ne rentreront donc pas dans notre classement
- Les exigences d'architecture physique entraînent des problématiques de déterminisme et de délai
- Les exigences de modes entraînent des problématiques de débit, de différenciation de service, et d'énergie,
- Les exigences de communication / protocole entraînent des problématiques de débit, de déterminisme, de délai, d'énergie, de tolérance aux pertes, et de différenciation de service
- Les exigences de liaison RF entraînent des problématiques de débit, de déterminisme, et de tolérance aux pertes
- Les exigences de gestion des pannes et maintenance entraînent des problématiques de délai, d'énergie, et de tolérance aux pertes
- Les exigences d'énergie entraînent des problématiques de débit, d'énergie, et de différenciation de service
- Les exigences d'interfaces du réseau entraînent des problématiques de tolérance aux pertes
- Les exigences de dimensions terminaux, routeurs et concentrateurs entraînent des problématiques de produit fini

- Les exigences de plateformes d'essais et environnement des démonstrateurs entraînent des problématiques des problématiques d'énergie, de tolérance aux pertes, et de produit fini

On peut alors reclasser les exigences par critères avec un angle de vision relatif aux verrous technologique comme suit :

- Débit : qui est l'unité mesurant la vitesse de transmission des données dans la voie de communication. Pour cette liaison numérique, il s'agit du nombre de bits transférés en un temps donné. Le débit s'exprime en kbps (kilobits par seconde).
- Déterminisme :
 - Le système étant dans l'état S_i et étant donné un événement E , on peut déterminer l'état suivant $S_{i+1} = f(S_i, E)$
 - Les mécanismes retenus éviteront au niveau MAC les effets de la compétition (pas de tirage au sort) et au niveau de la couche physique les erreurs d'identification des événements (trame qualifiée correcte par son CRC devra l'être avec une très grande probabilité)
- Délai :
 - Délai de remise d'une information = durée écoulée entre : l'instant de demande d'émission de cette information par son producteur et l'instant de remise à son destinataire final dans le réseau considéré
 - Prend en compte le délai de transmission, la durée de propagation, la durée de séjour en file d'attente
- Energie : comme on l'a déjà signifié, développer un module d'alimentation pour notre système n'est pas une priorité. En revanche, la connaissance exacte des besoins en alimentations et leur optimisation sont des éléments qui nous intéressent et qui serviront d'entrée et d'état de l'art pour un projet complémentaire.
- Tolérance aux pertes et Robustesse : quantité d'information (nombre de bit) perdue tolérée. La perte d'information pendant la transmission dans notre cas peut être dues à des erreurs de routage, des congestions, à des connections intermittente dues aux différents obstacles de la structure.
- Différenciation de services :
 - Identifier dans le trafic soumis au réseau des classes de trafic contraintes par des exigences différentes
 - Traiter les trafics selon leur classe
- Produit Fini
 - Volume
 - Masse
 - Packaging
 - Maintenance

On obtient alors la grille de lecture suivante :

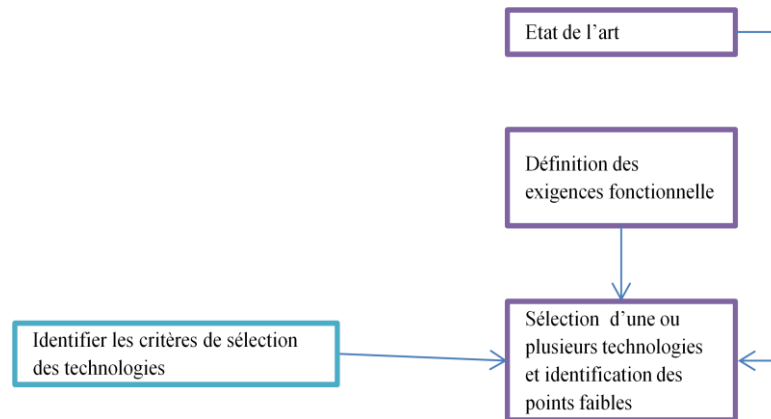
| | Débit | Déterminisme | Délai | Energie | Tolérance aux pertes / Robustesse | Différenciation de services |
|------------------------------------|-------|--------------|-------|---------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Robustesse et Fiabilité | X | X | | | X | X |
| Disponibilité Fréquentielle et CEM | X | | | | | |
| Sécurité | X | | | | | |
| Temps réel et Energie | X | X | X | X | | X |

De nombreux autres critères importants du point de vue d'un produit fini ou de certaines problématiques strictement applicatives ne font pas partie des critères de sélection de notre architecture : Déploiement, Localisation, Maintenance, Masse, Encombrement pour des contraintes budgétaires et temporelles. Le respect de ces contraintes de premier ordre est fondamental et incontournable dans un projet. Le choix de faire passer tous les critères applicatifs en deuxième plan était relativement évident dans le sens où le niveau de qualification souhaité était TRL5.

On peut alors classer les critères de la façon suivante :

| Critère primaire | Critères secondaire | Critères tertiaires |
|---|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Débit • Déterminisme • Différenciation de service | <ul style="list-style-type: none"> • Délai • Economie d'énergie • Tolérance aux pertes / Robustesse | <ul style="list-style-type: none"> • Déploiement • Localisation • Exploitation • Maintenance • Masse • Encombrement |

5.2. Technologies finalement sélectionnées



Rappelons la liste des technologies envisagées au départ, disponibles sur le marché (état de l'art § 2.2.3.1)

- UWB
- Bluetooth
- WiFi Low Power
- ZigBee 802.15.4
- WiFi
- ISA100
- Wireless Hart
- WiDom

Les 4 dernières technologies (Wifi, ISA 100, Wireless Hart et WiDom) ont été éliminées lors du premier tri en § 2.2.4.1. En effet Wifi n'est pas envisageable à cause de la combinaison de trois facteurs que sont sa consommation d'énergie (beaucoup trop importante), la difficulté que l'on rencontrera à protéger le réseau (pas assez sécurisable) et les perturbations que pourront représenter les solutions d'*infotainment* (émission dans la même bande de fréquence que Wifi). En ce qui concerne le Wireless Hart, cette solution est trop rigide pour être modifiée et n'est viable que pour des applications de contrôle commande. Pour ce qui est du WiDom, le fait que cette technologie ne s'appuie pas sur un standard risque d'être problématique pour la pérennité de notre solution. Pour finir ISA 100 n'a pas d'implémentation commerciale connue et n'est pas assez mature pour l'envisager sérieusement.

Il reste donc UWB, ULP, Wifi Low power et ZigBee 802.15.4.

5.2.1. UWB

L'avènement de la technologie Ultra Large Bande (UWB pour Ultra Wide Band en anglais) vient compléter l'offre actuelle en moyens de communication à courte portée tels que WiFi, Bluetooth, ZigBee.

Ceci est prévu comme une option de la spécification du standard IEEE 802.15.4-2011 pour la couche physique avec l'utilisation de 4 canaux de 3.1 GHz à 4.84 GHz et de 11 canaux de 6.0 GHz à 10.6 GHz. Le débit brut associé est élevé mais fortement variable selon les conditions d'utilisation.

Nous pouvons recenser les limitations suivantes de cette technologie pour notre système:

- Problèmes de disponibilité du matériel et de la spécification, d'accès aux couches basses, de déterminisme, ...
- Problèmes de compatibilité fréquentielle vis-à-vis des exigences aéronautiques et de design de l'antenne pour des bandes de fréquences élevées.

5.2.2. Ultra Low Power Bluetooth

Bluetooth est défini comme une technologie de transmission sans fil à courte portée et à faible débit. ULP (Ultra Low Power) Bluetooth résulte de l'intégration des composants à faible consommation supportant un sous ensemble de fonctionnalités Bluetooth.

Il est caractérisé par :

- Une technologie en étoile
- Un nombre de nœuds en fonction de l'implémentation, 7 dans un piconet
- Des sauts de fréquence qui permettent de ne pas rester sur les fréquences brouillées, mais qui n'évitent pas les pertes et restent chers en énergie
- Comparé au 802.15.4, le Bluetooth ULP à une portée radio plus faible mais un plus grand débit.

5.2.3. WiFi Low Power

Le WiFi Low Power, noté WLP, permet de supporter un débit plus élevé que 802.15.4. Un débit brut est de 1 à 2 Mb/s

Pour le projet on rencontrera des problèmes de disponibilité du matériel, de spécification, d'accès aux couches basses et de déterminisme

5.2.4. 802.15.4

Le Débit brut est limité à 250 kbit/s au niveau physique pour les technologies classiques et éprouvées basées sur la couche physique 2450 DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*). La nouvelle spécification du standard 802.15.4 publiée en 2011 définit en option la couche physique 2450 CSS (*Chip Spread Spectrum*). Elle permet d'atteindre un débit de 1Mb/s mais cette technologie n'a que très peu de fournisseurs et en conséquence n'est pas éprouvée.

5.2.4.1. *Evaluation du débit demandé par un capteur dans les conditions les plus favorables :*

- Absence de perte et délai de propagation nul
- Agrégation à la source: envoi d'une trame tous les e échantillons avec paquets au niveau MAC.
- En supposant un accès déterministe, tous les capteurs sur ce canal étant sollicités à tour de rôle pour une durée

$$t_{slot} \geq t_{trans} + t_{back} + t_{ack}, \text{ (eq 1)}$$

Avec temps de retournement $t_{back}=0.2$ ms et temps d'acquittement $t_{ack}=0.3$ ms

- **Exemple:**

- 10 kéchantillons/s $\Rightarrow t_{sample}=0.1$ ms, 1 échantillon sur 1 octet

En 802.15.4 la trame comprend 8 e bits utiles + 88 bits d'overhead MAC (soit 11 octets se répartissant comme suit : 2 octets Frame Control, 1 octet Sequence Number, 2 octets Pan id, 4 octets @ source et @destination , 2 octets FCS).

Dans 802.15.4, la taille de la trame max à envoyer par la couche physique est 133 octets soit : 116 octets de charges utile, 11 octets d'overhead MAC et 6 octets d'overhead Physique.

- Soit t_{trans} le temps nécessaire à l'émission de la trame de taille maximum à partir du moment où le 1er bit est émis.

$$t_{trans} = (133 * 8) / 250 \text{ ms} = 4,256 \text{ ms}$$

- Soit c le nb de capteurs connectés au même canal.

La trame de 8 e bits générée par un capteur donné est émise tous les $c t_{slot}$ unités de temps. Pour que le réseau écoule le trafic soumis, il faut

$$c t_{slot} \leq e t_{sample} \quad \text{(eq 2)}$$

- Soit d_{max} le temps max de vieillissement d'un échantillon, en supposant que la paquetsation est faite au niveau MAC.

$$c t_{slot} \leq d_{max} \quad \text{(eq 3)}$$

Trame agrégée compatible avec taille max utile de la trame 802.15.4 au niveau MAC

$$8e + (11 \cdot 8) \leq l_{\max} \text{ avec } l_{\max} = 127 \text{ octets} \quad (\text{eq 4})$$

Avec 802.15.4, la taille maximum utile est de 127 octets soit $l_{\max} = 1016$ bits.

On obtient $e = 116$ échantillons max par trame.

→ On a alors $t_{\text{trans}} = 4.256$ ms.

Prenons $t_{\text{slot}} = 4.8 \text{ ms} > 4.756 \text{ ms} = t_{\text{trame}} + t_{\text{back}} + t_{\text{ack}}$.

Pour pouvoir écouler la charge soumise et donc satisfaire l'équation 2, on ne peut gérer que deux capteurs par canal.

Si par ailleurs, le délai maximum de vieillissement est petit, l'équation 3 devient alors contraignante et c'est elle qui détermine le nombre maximum de capteurs supportés sur un canal. Au niveau recherche, nous étudierons une architecture permettant si possible de lever ce verrou.

5.2.4.2. Spécifications des fréquences et débits pour 802.15.4

Le tableau récapitule les spécifications en ce qui concerne les fréquences, le débit et les techniques de modulation pour le standard IEEE 802.15.4 de la version 2011.

| Couche physique (Mhz) | Bande de fréquences (Mhz) | Paramètres de propagation | | Paramètres de données | | | |
|--|---------------------------------|---|---|----------------------------|------------------------------------|--------------------------|----------------------|
| | | Débit de chips (kchips/s) | Modulation | débit en bits (kb/s) | Débit en symbols (ksymbol/s) | symbols | |
| 780 | 779-787 | 1000 | O-QPSK | 250 | 62.5 | 16-ary orthogonal | |
| 780 | 779-787 | 1000 | MPSK | 250 | 62.5 | 16-ary orthogonal | |
| 868/915 | 868-868.6 | 300 | DSSS + BPSK | 20 kb/s | 20 | Binary | |
| | | 400 (optionnel) | DSSS + O- QPSK | 100 kb/s | 25 | 16-ary orthogonal | |
| | | 400 (optionnel) | PSSS + BPSK et ASK (Amplitude Shift Keying) | 250 kb/s | 12.5 | 20 bit PSSS | |
| | | 902-928 | 600 | BPSK | 40 kb/s | 40 | Binary |
| | | | 1000 | DSSS + O- QPSK | 250 kb/s | 62.5 | 16-ary orthogonal |
| | 1600 | | PSSS + BPSK et ASK (Amplitude Shift Keying) | 250 kb/s | 50 | 5- bit PSSS | |
| | 950 | 950-956 | --- | GFSK | 100 | 100 | Binary |
| 950 | 950-956 | 300 | BPSK | 100 | 100 | Binary | |
| 2450 (DSSS) | 2400- 2483.5 | 2000 | O-QPSK | 250 kb/s | 62.5 | 16 ary orthogonal | |
| UWB sub gigahertz (optional) | 250-750 | | | | | | |
| 2450 CSS Chirp Spread Spectrum (optional) | 2400- 2483.5 | | DQPSK avec CSS | 250kb/s | 62.5 | 8-ary | |
| | | | | 1Mb/s | 166.667 | 16-ary bi- orthogonal | |
| UWB low band (optionnel) | 3244-4742 | Condition d'environnement (température) pour l'usage de la UWB. | | | | | |
| UWB high band (optionnelle) | 5944-10 234 | Condition d'environnement (température) pour l'usage de la UWB. | | | | | |

5.2.5. Comparaison des différentes technologies

Fort des critères problématiques primaires §5.1.2, comparons les quatre technologies finalistes afin d'affiner notre choix :

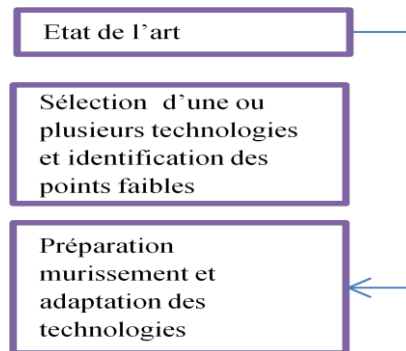
| | Débit | Consommation énergétique | Portée | Déterminisme |
|---|-----------------------------------|---|-------------------|---|
| 802.15.4 | 250 kb/s | 20 mW– 40 mW | < 30m | -Oui en mono saut. -Extension possible en multi sauts. |
| Wifi Low Power | 921,6 kb/s | Rx :85 mA Tx : 154 mA | 50-70M Indoor | NON |
| Wifi Low Power IEEE 802.11 b/g RN-XV | Plus de 1 Mb/s jusqu'à 54 Mb/s | Rx: 35 mA Tx: 120 mA Sleep: 4 μ A | 200m (outdoor) | NON |
| UWB | 1 Mb/s 27Mb/s (802.15.4a) | | <30m | NON |
| ULP Bluetooth | 1 Mb/s | Tx : 24 mA Rx : 19.6 mA | <10 m | Oui en mono saut |

RN_XV (802.11b/g)

| Puissance de sortie | Consommation 802.11 b (2Mbps) | Consommation 802.11g(24Mbps) |
|---------------------|----------------------------------|------------------------------|
| 0 | 120 mA | 135 mA |
| 2 | 130 mA | 150 mA |
| 4 | 170 mA | 190 mA |
| 6 | 175 mA | 200 mA |
| 8 | 180 mA | 210 mA |

5.3. Préparation et adaptation des protocoles sélectionnés :

D'après l'étude comparative ci-dessus, déduite des résultats obtenus jusqu'ici, on a choisi d'investiguer et de modifier deux protocoles (répondant au maximum d'exigences et satisfaisant au mieux les critères problématiques soulignés) : le 802.15.4 pour les applications dynamiques et le 802.11 Low power pour les applications statiques :



Voici les objectifs d'amélioration possibles pour chaque technologie envisagée :

5.3.1. 802.15.4

| Technologie | Topologie | Objectif d'Amélioration | Moyen Innovant Investigué | Conséquences sur Matériel |
|-------------|-----------|------------------------------|--|--|
| 802.15.4 | Module | Antenne | | |
| | | Multi-interface | | |
| | | Modulation | Robustification de la modulation | Modulation robuste*** |
| | Etoile | Débit | Accès au Médium Multi-canal | (1) Possibilité d'accès aux couches basses pour modifier la méthode d'accès (2) ... et rendre la méthode d'accès multi-canaux |
| | | | Concentrateur multi-interfaces homogènes (*) (indispensable) | (3) Conception module intégrant plusieurs interfaces |
| | | Déterminisme | Accès au médium déterministe en mono-saut | (1) Possibilité d'accès aux couches basses pour modifier la méthode d'accès (4) ... et synchroniser les nœuds à 1 saut |
| | | Robustesse aux perturbations | Accès au Médium Multi-canal | (1) Possibilité d'accès aux couches basses pour modifier la méthode d'accès et (2) rendre la méthode d'accès multi-canaux |
| | | | Sélection des meilleurs canaux à utiliser | (5) Indication du canal utilisé par pilotage de la couche MAC |

| | | | | |
|--|------|------------------------------|--|---|
| | Ilot | Consommation d'énergie | Ordonnancement des périodes d'activité et d'inactivité | (1) Possibilité d'accès aux couches basses pour modifier la méthode d'accès (4) ... et synchroniser les nœuds à 1 saut |
| | | Débit | Accès au Médium Multi-canal | (1) Possibilité d'accès aux couches basses pour modifier la méthode d'accès (2) rendre la méthode d'accès multi-canaux (6) ... et synchroniser les nœuds en multi-sauts |
| | | | Concentrateur multi-interfaces homogènes | (3) Conception module intégrant plusieurs interfaces |
| | | Déterminisme | Accès au médium déterministe en multi-sauts et mono-saut | (1) Possibilité d'accès aux couches basses pour modifier la méthode d'accès et (6) |
| | | Robustesse aux perturbations | Accès au Médium Multi-canal | (1) Possibilité d'accès aux couches basses pour modifier la méthode d'accès et (2) rendre la méthode d'accès multi-canaux |
| | | | Sélection des canaux utilisés | (5) Indication du canal utilisé par pilotage de la couche MAC |
| | | Consommation d'énergie | Ordonnancement des périodes d'activité et d'inactivité | (1) Possibilité d'accès aux couches basses pour modifier la méthode d'accès et (6) synchroniser les nœuds en multi-sauts |

5.3.2. 802.11 Low Power

| Technologie | Topologie | Objectif d'Amélioration | Moyen Innovant Investigué | Conséquences sur Matériel |
|------------------|-----------|---|--|---|
| 802.11 Low Power | Module | Antenne | | |
| | | Multi-interface | | |
| | | Modulation | Robustification de la modulation | Modulation robuste*** |
| | Etoile | Déterminisme | Accès au médium déterministe en mono-saut | (1) Possibilité d'accès aux couches basses pour modifier la méthode d'accès (4) ... et synchroniser les nœuds à 1 saut |
| | | Robustesse aux perturbations | Accès au Médium Multi-canal (**) | (1) Possibilité d'accès aux couches basses pour modifier la méthode d'accès et (2) rendre la méthode d'accès multicanaux |
| | | | Sélection des canaux utilisés (**) | (5) Indication du canal utilisé par pilotage de la couche MAC |
| | | Consommation d'énergie | Ordonnancement des périodes d'activité et d'inactivité | (1) Possibilité d'accès aux couches basses pour modifier la méthode d'accès (4) ... et synchroniser les nœuds à 1 saut |
| | Ilot | Au vu du débit et de la portée radio offerts par la technologie, on limite l'étude du WiFi à une étoile pour le démonstrateur | | |

(*) Homogène : de la même technologie

(**) Si les deux technologies cohabitent il est peu pensable de tirer bénéfice de l'usage du multi-canal au niveau 802.11.

(***) Identification d'une modulation robuste permettant la coexistence du WIFI Low Power et le IEEE 802.15.4

5.4. Amélioration du débit (critère majeure identifié)

Deux technologies ont été sélectionnées pour répondre à notre besoin et seront implémentées sur SAHARA mais celles-ci devront être modifiées. On exposera ici les améliorations possibles sur le débit puisqu'il a été identifié comme critères problématique primaire.

Nous citons ci-dessous différentes techniques permettant d'améliorer le débit et de réduire l'*overhead* (l'enveloppe de l'information utile aux applications) des protocoles de communication. Cependant, il faut s'assurer du respect des autres critères importants dans la conception de l'architecture du réseau tels que le délai, la consommation en énergie...

5.4.1. Agrégation

Les techniques d'agrégation sont des techniques visant à réduire l'*overhead* résultant des protocoles de communication.

5.4.1.1. Agrégation à la source

Agrégation temporelle des échantillons pour un capteur: les échantillons étant codés sur 1 ou 2 octets, il est possible de concaténer plusieurs échantillons dans une même charge utile de paquet (*payload*).

Estimation du nombre maximum d'échantillons agrégeable : environ 100 échantillons/paquet 802.15.4. Cette estimation résulte de la contrainte imposée par la taille maximum des données utilisateur (*payload*) dans une trame 802.15.4 et la taille d'un échantillon, supposée égale à un octet. (Voir équation 4 en section 5.2.4.1)

5.4.1.2. Agrégation sur un nœud intermédiaire

Agrégation multi-sources: Les sources S_1, \dots, S_N émettent chacune un échantillon de taille M octets. Le nœud A est un agrégateur.

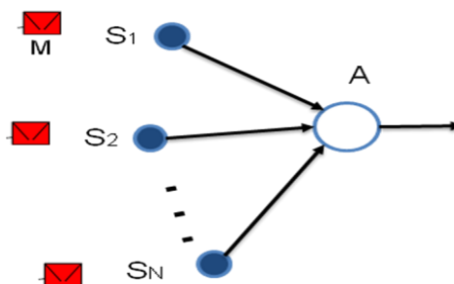


Figure 34 : Agrégation sur nœud intermédiaire

Estimation du nombre maximum d'échantillons agrégeables : la taille des échantillons agrégés doit être inférieure à la taille maximum de la *payload* d'une trame. Le nombre d'échantillons agrégés peut varier d'une source à l'autre.

5.4.2. Compression sans pertes

5.4.2.1. Compression à la source

L'intérêt du codage à la source consiste à transformer une suite de données (ou de bits) en une suite plus courte. Cette opération de codage utilise des algorithmes particuliers pour rendre la représentation compressée plus courte que la représentation d'origine.

5.4.2.2. Compression dans le réseau

Plusieurs algorithmes de compression sans pertes ont été proposés afin de réduire la quantité des données qui doivent être transmises à travers le réseau.

Exemple de technique : *Coding by ordering*

Les données de plusieurs capteurs sont combinées par un nœud de compression. Certaines données sont supprimées. Cependant, les données abandonnées peuvent être calculées à partir de l'ordre de codage des données incluses.

Exemple : On a 4 nœuds dont les identifiants sont : N1, N2, N3 et N4 qui envoient leurs données vers un agrégateur de données « A ». Chacun des 4 nœuds génère une donnée dont la valeur appartient à l'ensemble $\{0..5\}$. L'agrégateur « A » peut décider de supprimer le paquet du nœud N4 et choisit un ordre approprié des paquets des nœuds N1, N2 et N3 pour indiquer la valeur générée par le nœud N4. Le tableau montre un « mapping » possible des permutations des 3 identifiants vers des entiers entre 0 et 5.

| ordre des paquets dans le message | Valeur |
|-----------------------------------|--------|
| N1 N2 N3 | 0 |
| N1 N3 N2 | 1 |
| N2 N1 N3 | 2 |
| N2 N3 N1 | 3 |
| N3 N1 N2 | 4 |
| N3 N2 N1 | 5 |

Ainsi, on peut remplacer la donnée du paquet de N4 en utilisant une des permutations données dans le tableau.

Remarque : Dans cette technique, on considère que l'ordre des paquets pour l'application n'est pas important.

5.4.3. Multi-interfaces

5.4.3.1. Multi-interfaces mono-technologie

Il s'agit d'équiper un nœud avec un certain nombre d'interfaces physiques de la même technologie et de faire travailler ces interfaces en parallèle. Cela permet d'augmenter le débit offert par cette technologie au niveau du réseau.

Exemple pour la technologie 802.15.4 :

- Une interface 802.15.4 = 250 kb/s au niveau physique.
- Deux interfaces 802.15.4 parallélisées < 500 kb/s.

5.4.3.1.1. Multi-interfaces multi-technologies

Il s'agit d'équiper un nœud avec un certain nombre d'interfaces physiques de technologies différentes. Du point de vue débit, cela permet de passer d'une technologie « bas débit et courte portée » vers une autre technologie « haut débit et moyenne portée ». Du point de vue délai, on minimise le nombre de sauts en raison de la portée radio de la technologie « haut débit ».

5.4.3.1.2. Problématique des nœuds multi-interfaces

Le problème majeur des nœuds radio multi-interfaces est causé par les interférences des interfaces multiples du nœud.

5.4.3.1.3. Multi-interfaces mono ou bi-technologies

Interférence entre émission et réception simultanées sur deux interfaces d'un même nœud radio : difficulté de réalisation du design des cartes au niveau CEM en raison du différentiel de puissance de signal entre la réception et la transmission simultanées.

Le problème est le suivant : peut-on estimer la distance minimum (voir schéma ci-dessous) entre les interfaces d'un nœud radio multi-interfaces afin d'éviter une dégradation des communications radiofréquences qui serait liée aux interférences mutuelles ?

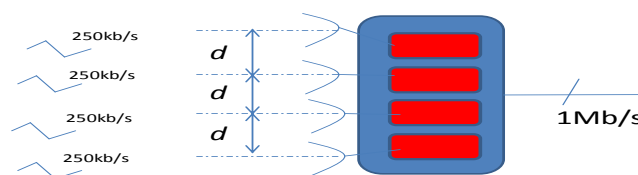


Figure 35 : Nœud radio multi-interfaces

Le nœud radio multi-interfaces dispose de plusieurs interfaces, par exemple 4 sur la Figure 35, chaque interface opère sur un canal. Le nœud radio travaille en parallèle sur les 4 canaux à la fois, mais ne fait pas forcément la même chose sur tous les canaux : ex.: en réception sur canal 1 et en émission sur canal 2.

Objectif visé : multiplier le débit par 4 => pour obtenir 1Mb/s, les 4 interfaces du nœud radio multi-interfaces travaillent en parallèle sur 4 canaux différents, chaque canal a un débit de 250kb/s

Exemple de combinaison possible :

Le nœud multi-interfaces transmet ou reçoit sur canal 1,
tout en transmettant ou recevant sur canal 2,
tout en transmettant ou recevant sur canal 3,
et tout en transmettant ou recevant sur canal 4.

Evaluation de la distance minimum d :

En se basant sur des études qui ont porté sur la coexistence RF 802.11 et 802.15.4 on considère un brouilleur Zigbee qui interfère sur une communication entre nœuds Zigbee. Afin de limiter la puissance du brouilleur à -26dbm (0.05 mw), ce dernier doit être placé à une distance d minimum de l'ordre de quelques dizaines de centimètre. Dans la problématique qui est la nôtre nous considérons 3 brouilleurs ; sous réserve de vérifications ultérieures, la distance d minimum est encore plus grande et donc de l'ordre de quelques dizaines de centimètres.

Remarques à propos des solutions proposées pour satisfaire les contraintes de débit :

Cette solution met en avant des débits, qui sont des débits théoriques du IEEE 802.15.4 qui ne sont jamais atteints en pratique.

Pour diminuer la distance d , il serait nécessaire d'utiliser des canaux IEEE 802.15.4 suffisamment éloignés pour ne pas interférer entre eux. Le nombre de canaux d'écart à respecter dépend de la qualité du transceiver utilisé. En pratique, sur les 16 canaux du IEEE 802.15.4 dans la bande du 2.4 GHz seuls 5 à 7 canaux maximum pourraient probablement être utilisés sur un nœud radio multi-interfaces.

Une évaluation des distances d de la Figure 35 peut être envisagée, mais elle pose la question de la pertinence des résultats que nous obtiendrons vis à vis de l'environnement réel dans lequel seront placés les capteurs.

5.4.3.1.4. Multi-interfaces mono bi-technologies

Coexistence fréquentielle de technologies différentes: la Figure 36 illustre un exemple de coexistence fréquentielle 802.15.4 / 802.11 Amérique du Nord : nous avons seulement 4 canaux 802.15.4 qui ne sont pas brouillés par une activité WiFi cohérente (i.e. sur des canaux sans recouvrement comme indiqué dans la Figure 36 pour 802.11b).

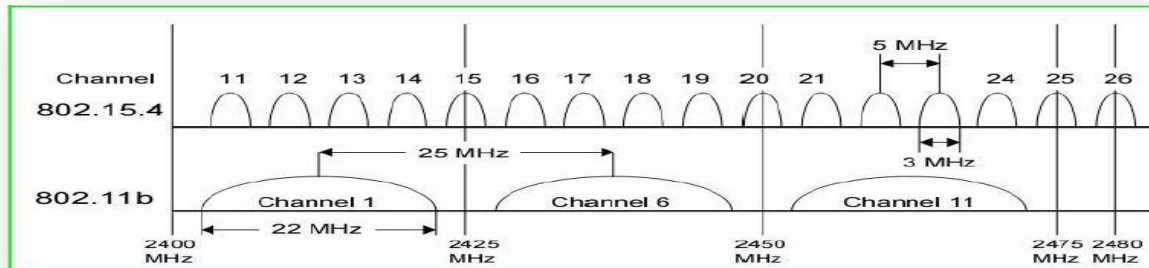


Figure 36 : Spectre fréquentiel des technologies 802.11 Amérique du Nord

La Figure 36 varie légèrement selon qu'il s'agisse des bandes de fréquences utilisables en Europe ou celles en Amériques du Nord, cette remarque ne change pas la nature du problème.

5.4.4. Techniques de modulation

Pour améliorer le débit au niveau de la couche physique, on peut avoir recours à différentes techniques de modulation.

5.4.4.1. Changement en ligne de technique de modulation

Le changement en ligne de technique de modulation permet d'augmenter le débit en s'adaptant aux types de bruit en diminuant le BER (Bit Error Rate). Ainsi, il est possible d'augmenter le nombre de bits par symbole. Ceci peut nécessiter le recours à la radio logicielle.

La radio logicielle, notée SDR pour Software Defined Radio, est composée d'un matériel de réception du signal radio fréquence pilotée par une plate-forme logicielle. L'objectif consiste à utiliser des composants logiciels à la place du matériel pour le traitement du signal.

Ce système est composé principalement d'un ordinateur/ordinateur embarqué exécutant la plate-forme logicielle, d'une sortie radio fréquence RF et d'un convertisseur analogique/numérique ADC (et/ou d'un convertisseur numérique/analogique DAC). Une radio logicielle est meilleure si les convertisseurs ADC et DAC sont les plus proches de l'antenne radio. Ce qui permet de grandes possibilités de traitement du flux numérique au niveau logiciel. La plate-forme logicielle permet de définir un traitement spécifique au flux numérique entrant et sortant des convertisseurs. La Figure 37 montre une architecture générale d'une radio logicielle.

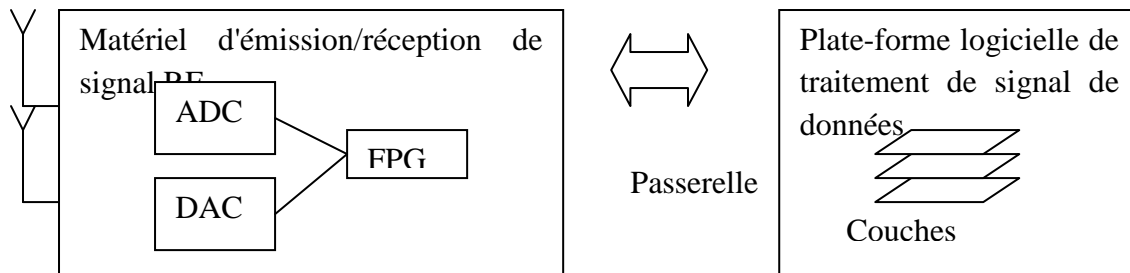


Figure 37 : Architecture générale d'une radio logicielle

5.4.4.1.1. Avantage :

- **L'avantage majeur de la radio logicielle est la flexibilité, la multifonctionnalité** et le coût bas des développements. La reconfigurabilité de la plate forme assure une réutilisabilité du matériel. Ceci minimise la complexité de conception des terminaux RF. Les performances d'une SDR peuvent être améliorées par l'usage d'un simple FPGA qui est programmable pour plusieurs applications, ce qui réduit la taille, le coût et le temps du développement.
- Les spécifications des standards des couches basses sont principalement mises en œuvre en matériel, avec la radio logicielle il est possible d'implémenter, modifier et adapter ces spécifications en logiciel.
- Adaptation de la transmission sans fil au contexte par un changement de modulation. Une modulation avec moins de niveaux permet un Bit Error Rate (BER) faible, mais au détriment du débit.
- Possibilité d'un accès dynamique au spectre dans le cas de pénurie de fréquence ce qui répond au problème de coexistence fréquentielle de technologies différentes.

5.4.4.1.2. Inconvénients

- Dans l'état actuel, la technologie radio logicielle ne permet pas de respecter les exigences d'encombrement du projet SAHARA mais reste une perspective intéressante pour valider des choix technologiques.

5.4.4.2. Étalement de spectre

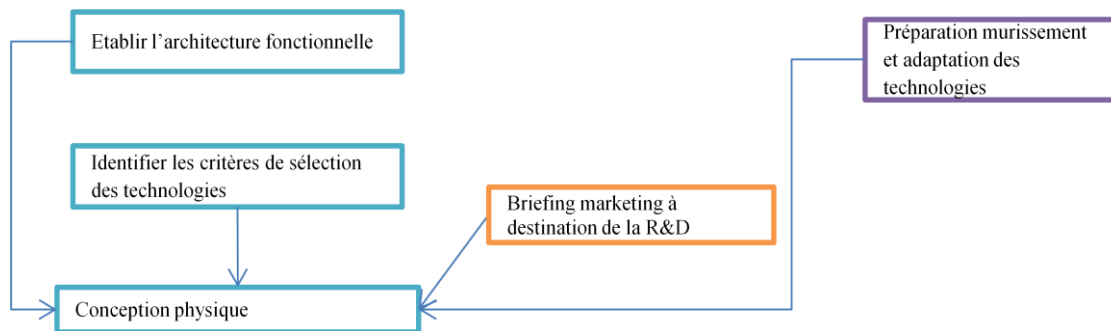
L'usage de technique **d'étalement de spectre** spécifique. Augmentation du débit dans les nouvelles spécifications du standard IEEE 802.15.4 publié en 2011 par l'usage de la CSS (Chirp Spread Spectrum) avec une modulation DQPK. Le débit peut être amené à 1Mb/s dans la bande de fréquence 2400MHz.

Nous pouvons également mentionner l'utilisation de l'Ultra Wide Band (UWB) pour augmenter le débit sans le recours aux multi-interfaces. UWB présente l'avantage de permettre une localisation fine <50 cm.

Réserves : UWB est une perspective au-delà du projet

5.5. Approche organique en phase projet

Conception physique (ou technique)



5.5.1. Architecture générique

5.5.1.1. Les composants

5.5.1.1.1. Terminal mono-interface:

Un terminal est un module radio (satellite autonome) qui peut être 802.15.4 ou Wifi Low Power. Il est connecté à un ou plusieurs capteurs (de pression, température, manomètre, etc.). Son rôle est de transmettre les informations capturées de son environnement vers d'autres modules.

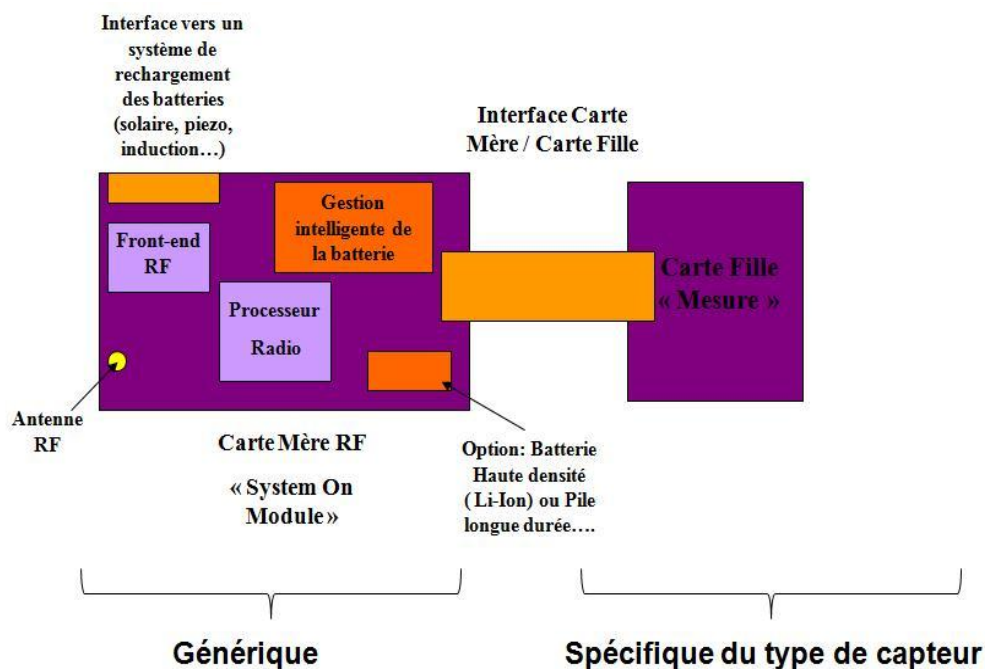


Figure 38 : Architecture modulaire proposée pour un terminal

L'architecture modulaire proposée pour un terminal est composée de 2 cartes : une carte « Fille » qui joue le rôle du « sensor » et une carte « Mère ». Cette dernière est composée du Front-end RF, du Processeur Radio, d'un microcontrôleur et de la batterie.

Cette architecture a pour avantage de conserver la généricité de la carte mère sur laquelle on peut connecter une grande variété de cartes filles. Ces cartes filles sont spécifiques du type de capteur (température, pression, ...)

5.5.1.1.2. Routeur / Concentrateur

Un Routeur a pour rôle d'acheminer les informations reçues de terminaux ou d'autres routeurs vers une entité de collecte de données appelée concentrateur. Un Routeur ne dispose pas de raccord avec le système hôte.

Le Concentrateur est un nœud du réseau sans fil qui est connecté au réseau filaire de l'aéronef. Par conséquent, il n'y a pas de contrainte de consommation d'énergie, de calcul et de mémoire. Les fonctions du Concentrateur en se référant aux spécifications des utilisateurs finaux sont :

- Concentration des données capturées par les terminaux capteurs.
- Contrôler la communication des capteurs à travers des ordres.

Un Routeur/Concentrateur peut être :

- **Mono-interface:** Il peut être 802.15.4 ou Wifi Low Power.
- **Multi-interfaces mono-technologie :** plusieurs interfaces 802.15.4 comme illustré sur la Figure 38.

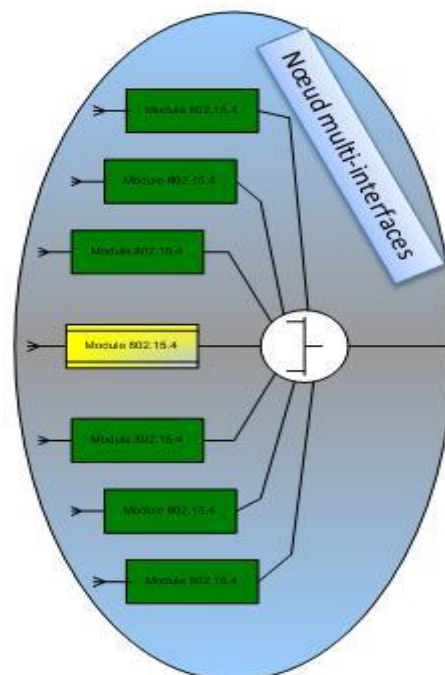


Figure 39 : Exemple d'architecture d'un module radio multi-interfaces

L'architecture de la Figure 39 présente un module radio composé de plusieurs interfaces 802.15.4 dont l'une peut être réservée au pilotage de la communication avec d'autres modules radio distants et ses propres interfaces (exemple : appariement sur un canal donné)

- **Multi-interfaces bi-technologies** : Une ou plusieurs interfaces 802.15.4 / une seule interface Wifi Low Power ou éventuellement plusieurs.

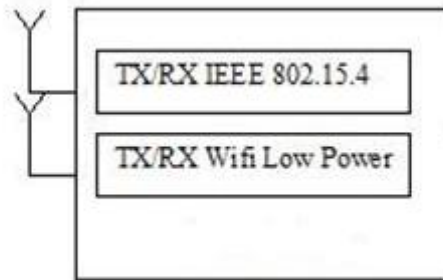


Figure 40: Module bi-technologies

- **Mono-interface bi-technologies** : la radio logicielle permet de basculer entre les deux technologies Wifi Low Power et IEEE 802.15.4 selon les besoins sur une même interface.

5.5.1.2. L'étoile

5.5.1.2.1. Etoile Wifi Low Power

L'ensemble des nœuds est mono-interface. Dans cette architecture subsiste la difficulté d'assurer le déterminisme si les couches basses de la technologie ne peuvent pas être modifiées.

5.5.1.2.2. Etoile Multi-interfaces 802.15.4

Les nœuds terminaux ont une seule interface 802.15.4 et le coordinateur d'étoile est multi-interfaces.

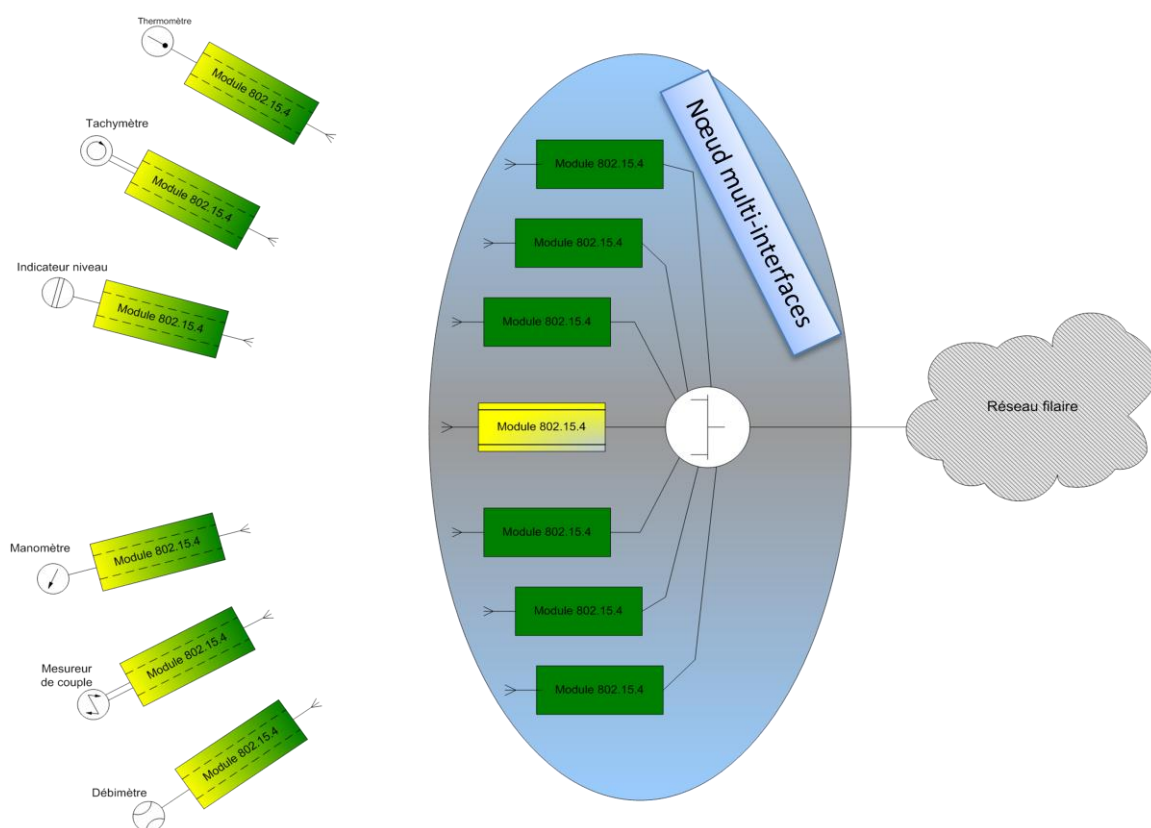


Figure 41 : Etoile multi-interfaces 802.15.4

Chaque terminal communique avec une interface du module multi interfaces qui joue le rôle de concentrateur, sur un canal défini par le protocole de communication.

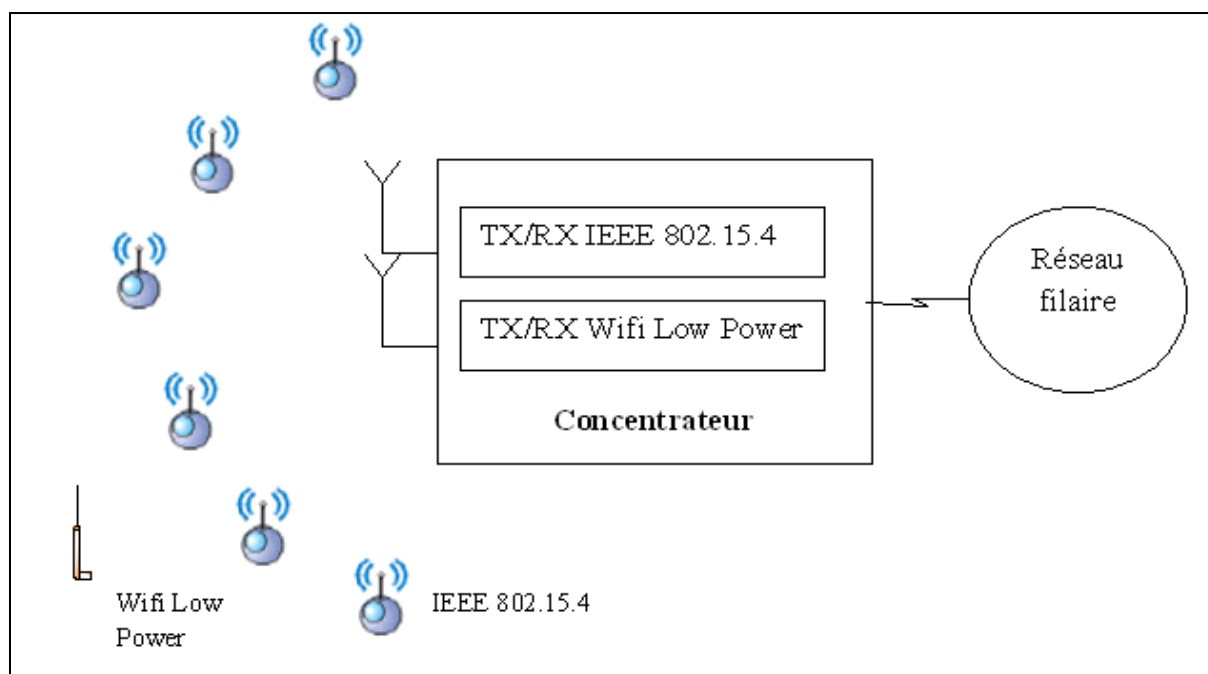


Figure 42 : Etoile en radio logicielle

Il est possible d'avoir une plate forme radio logicielle avec un usage adaptatif d'une couche physique spécifique pour chaque technologie :

- Wifi Low Power
- IEEE 802.15.4.

Grace à la radio logicielle, il est possible d'avoir une étoile contrôlant des modules WiFi Low Power et 802.15.4 comme l'illustre la Figure 42.

Les avantages de la radio logicielle sont :

- Mise en place d'un seul concentrateur pour les deux types de technologies.
- Différentiation de service à travers les deux types de nœuds de capteurs : déterminisme avec IEEE 802.15.4 et débit plus élevé avec Wifi Low Power.
- Centralisation de traitement des données reçues et de la coordination des modules capteurs.

Les réserves sont :

- Synchronisation du concentrateur pour basculer entre des nœuds communicants avec IEEE 802.15.4 et Wifi Low Power.
- Contraintes d'énergie, de calcul et de mémoire des modules de capteurs.

5.5.1.3. L'îlot

La topologie en étoile impose que la distance de tout capteur vers un concentrateur soit inférieure à la portée radio. Ceci n'est pas vrai dans le cas général. C'est le cas pour une partie seulement des applications visées par SAHARA.

Il est donc nécessaire d'avoir une solution multi sauts.

5.5.1.3.1. Ilot mono-technologie

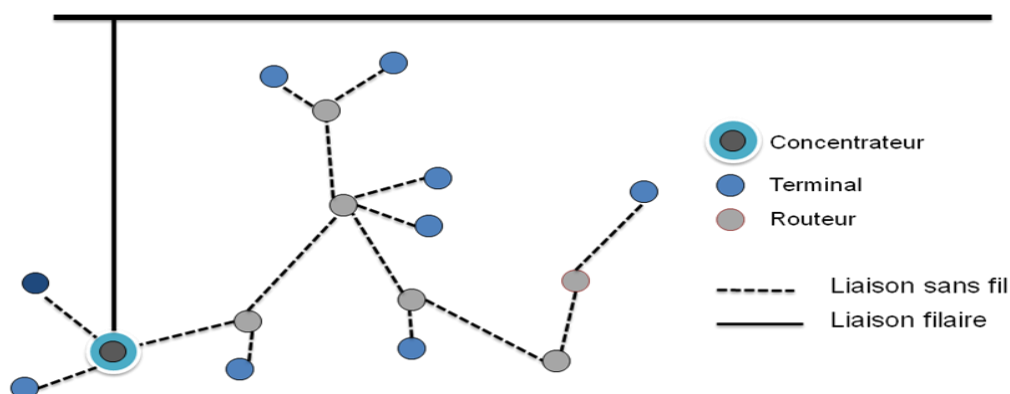


Figure 43 : ilot mono-technologie

- Wifi Low Power: cette technologie n'assure pas le déterminisme.
- 802.15.4: problème du débit faible → multi-interfaces ou bi-technologies → mécanismes de gestion d'allocation des canaux au sein de la technologie 802.15.4 et entre les technologies 802.15.4 et Wifi Low Power (exemple : cohabitation d'îlot 802.15.4 et une étoile WiFi Low Power).

5.5.1.3.2. Cohabitation de deux îlots avec technologies différentes

Nécessité de mécanismes de gestion d'allocation des canaux entre les deux technologies.

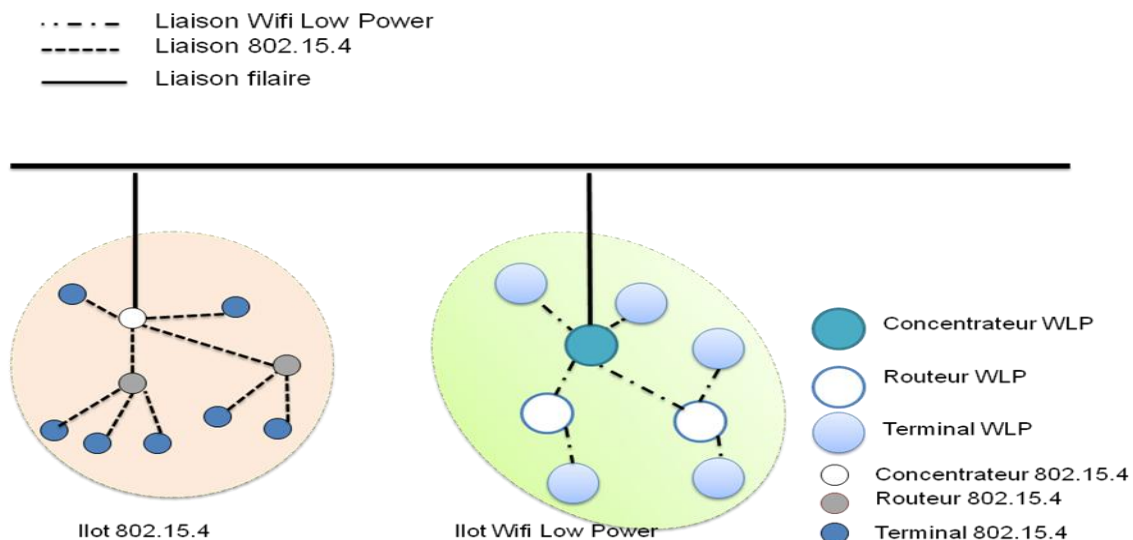


Figure 44 : Cohabitation de deux îlots avec deux technologies différentes

5.5.1.3.3. Îlot bi-technologies

- Dans ce type d'îlot, il y a la présence de routeurs multi-interfaces bi-technologies.
- Le choix de router un flux suivant une technologie ou une autre permet la différenciation de services.
- Problématique de faisabilité au niveau du design des modules bi-technologies (Routeur, Concentrateur).

5.5.2. Architecture du démonstrateur SAHARA

Notre but est de concevoir une architecture générique qui pourrait être instanciée en fonction des réponses que les partenaires apporteront aux contraintes technologiques mentionnées dans précédemment et des différentes applications ciblées par les *end users*.

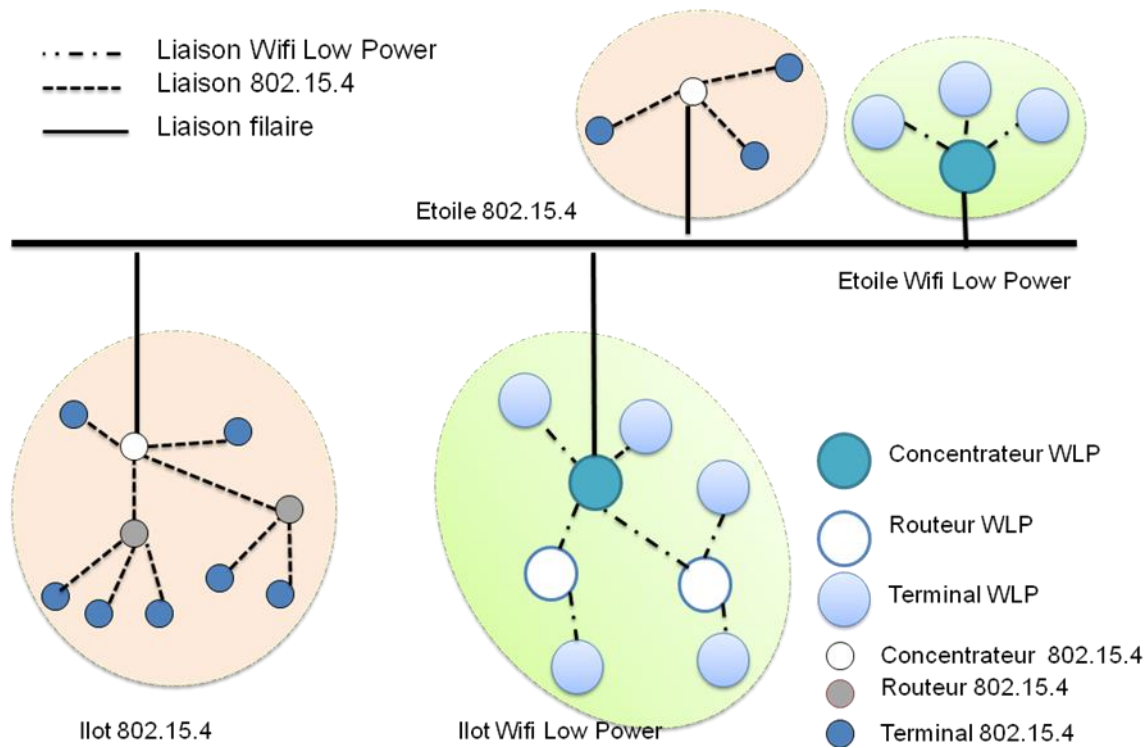


Figure 45 : Architecture Démonstrateur

Des ilots mono-technologie cohabitent fréquemment. Les étoiles sont des ilots particuliers avec un seul saut.

Proposition : séparer les besoins de mesure :

- Mesure bas débit / capteurs situés dans des zones peu accessibles : IEEE 802.15.4 est probablement la bonne solution.
- Mesure haut débit : WiFi Low Power est envisageable pour satisfaire les exigences de débit.
- Pour les capteurs situés dans des zones peu accessibles et nécessitant un débit élevé (et des envois fréquents de trames), il sera probablement délicat d'obtenir une autonomie énergétique de l'ordre de 5 ans => ils devront soit être alimentés par une alimentation externe au capteur, soit bénéficier des techniques de récupération d'énergie. Dès lors l'autonomie énergétique ne serait plus une contrainte.

Conclusion : L'adéquation entre les exigences applicatives et les performances que l'on peut raisonnablement espérer des architectures proposées reste un verrou, compte-tenu des technologies actuellement disponibles.

5.5.3. Architecture de Recherche

Cette architecture est conditionnée par la faisabilité technique des routeurs bi-technologies.

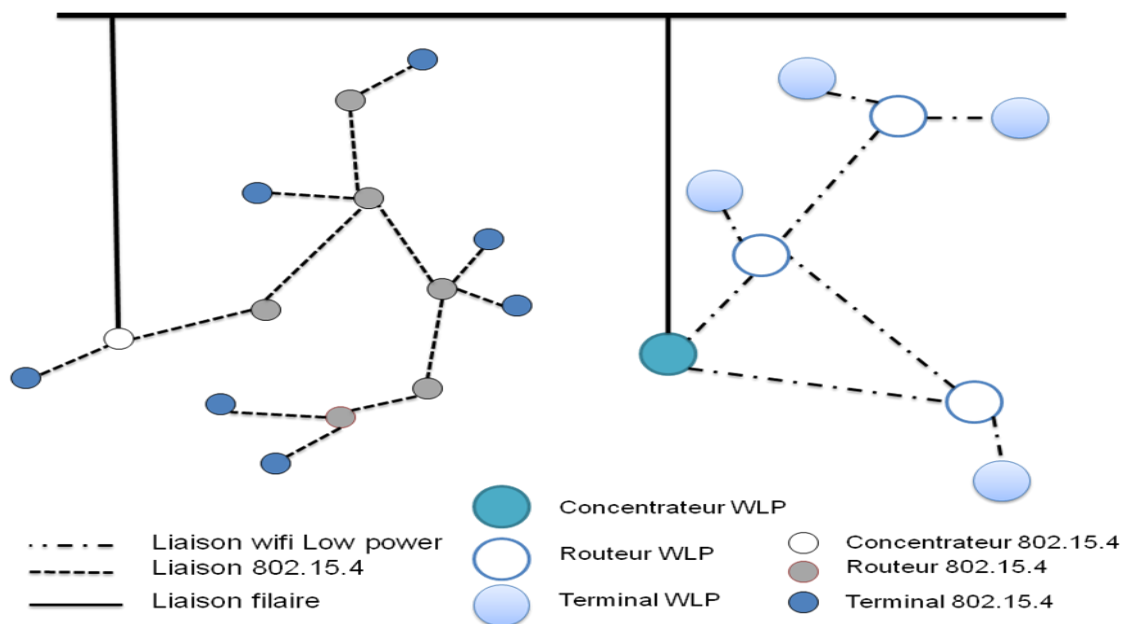


Figure 46 : Architecture étendue (1)

Dans ce type d'architecture, deux types d'îlot existent comme le montre la Figure 46 : un premier avec la technologie 802.15.4 et un deuxième avec la technologie WiFi Low Power. Ces îlots ne font pas que cohabiter mais ils sont combinés à l'aide des routeurs bi-technologies, comme indiqué sur la Figure 46. Un flux pourrait être routé par l'une ou l'autre des technologies en fonction de la qualité de service exigée par l'application. Cette architecture permet de rechercher le meilleur compromis entre des différents critères de performances recherchés (débit, délai, déterminisme, robustesse ...).

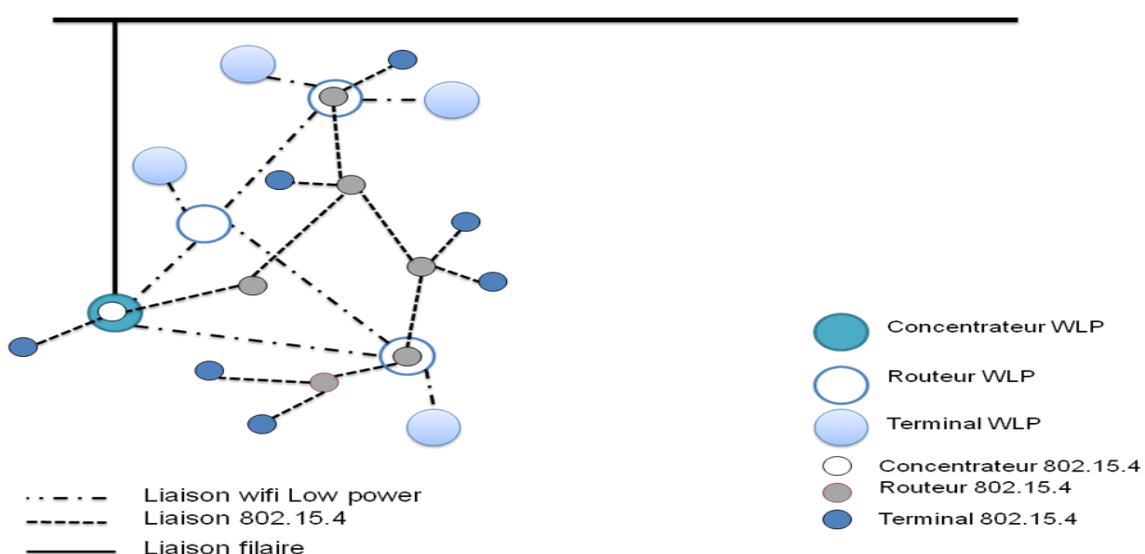


Figure 46 : Architecture étendue (2)

Avantages

- Flexibilité du design électronique (mono-technologie, bi-technologies) des Routeurs pour les fournisseurs de matériels.
- Différenciation de services : Déterminisme possible avec le 802.15.4.
- Redondance possible.

Discussions

- L'accessibilité au code des couches basses Wifi Low Power et la possibilité de le modifier conditionnent le déterminisme.
- Les contraintes d'encombrement et les conditions de coexistence fréquentielle des antennes d'une solution multi interfaces vont limiter le nombre d'interfaces et par conséquent le débit.
- Complexité du système: il faut des Routeurs bi-technologiques pour passer d'une technologie à une autre.
- Il reste à vérifier les contraintes autres que le gain en débit : délai, consommation d'énergie,...

En passant d'un nœud 802.15.4 mono interface à un nœud 802.15.4 multi interfaces (N interfaces), nous estimons que le débit est quasiment multiplié par N, Par conséquent, sous réserve de faisabilité, nous pouvons atteindre les performances du Wifi Low Power en terme de débit comme le montre le schéma ci-dessous.

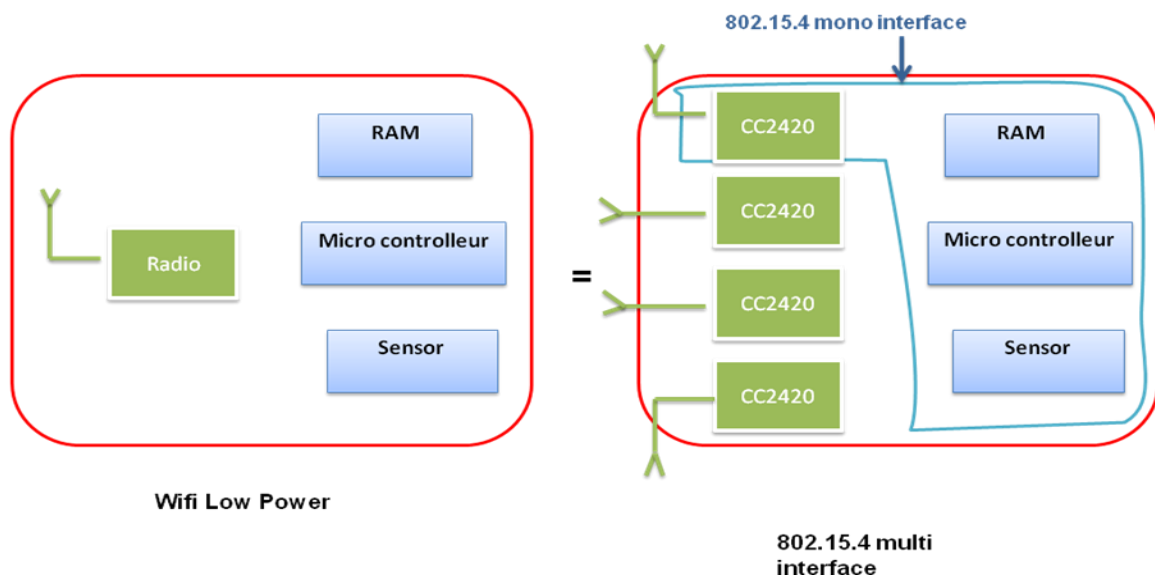


Figure 47 : Nœud multi-interfaces 802.15.4 "équivalent" à un nœud mono-interface WLP

Sous l'hypothèse que les deux modules contiennent les mêmes microcontrôleurs, les mêmes modules mémoire RAM et les mêmes capteurs, la consommation en énergie peut être estimée à l'aide du calcul suivant :

- 802.15.4 multi interfaces : $N * E(CC2420) + \text{Constante}$
- Wifi Low Power : $E(MRF24WB0Mx^1) + \text{Constante}$.

| | Wifi Low Power | 802.15.4 mono-interface | 802.15.4 multi-interface |
|----|----------------|-------------------------|--------------------------|
| Tx | 154 mA | 17.4 mA | $N * 17.4 \text{ mA}$ |
| Rx | 85 mA | 19.7 mA | $N * 19.7 \text{ mA}$ |

Ordre de grandeur : Une étoile 802.15.4 (sur un canal donné) permet d'espérer un débit max utile de l'ordre de 160 kbps. Dès que l'architecture est plus complexe (un îlot par exemple) le débit chute et la latence augmente.

5.5.4. Discussions sur les Exigences Système des End-Users

5.5.4.1. Exemples d'exigences difficiles ou impossibles à satisfaire

1) Débit :

Un Concentrateur ne pourra pas gérer 40 capteurs produisant chacun 10koctets/s.

2) Synchronisation des modules radio à 1 microseconde

Cette exigence reste à évaluer à 1 saut mais elle est impossible à plusieurs sauts

- **Sortie du mode veille forcée par radio**

3) Durée de vie = 5 ans

Cette exigence semble incompatible avec l'activité des nœuds.

Exemple : Une pile lithium 9V tient 180h pour alimenter le chip radio en réception sans passage en mode sommeil. Cette exigence ne peut être satisfaite que si on dispose des mécanismes de récupération d'énergie.

4) Support de 2000 modules radios

Cette exigence ne sera pas satisfaite dans SAHARA. Le nombre effectivement supporté dépendra des possibilités d'accès et modifications des couches basses des technologies utilisées.

Au niveau recherche, nous étudierons comment se rapprocher de cette valeur.

5) Tolérance aux fautes

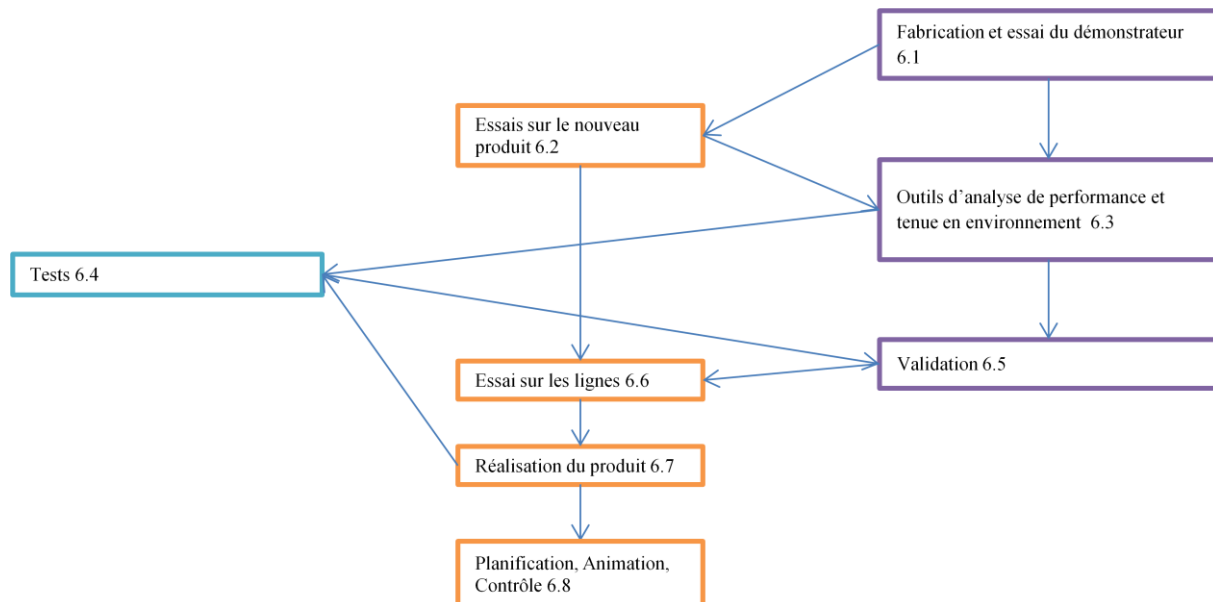
Dans le système SAHARA un module radio défaillant ne peut pas prévenir de sa défaillance. Exemple : un module n'a plus suffisamment d'énergie pour pouvoir communiquer. En revanche, le système SAHARA pourra satisfaire l'exigence suivante : ne pas remonter à l'application une info qui a été endommagée durant son transfert.

5.5.4.2. Exemples d'exigences lourdes sur protocoles réseau

Protection des données échangées : Le cryptage systématique des données a de lourdes conséquences sur les performances espérées du réseau sans fil.

6. Conclusion phase post innovation : l'approche organique en projet et post-projet

Rappelons les étapes restantes avant la commercialisation du système produit



1) Fabrication du démonstrateur : La fabrication du démonstrateur en lui-même, pourrait faire l'objet d'une thèse mais avec le travail effectué en amont, cette fabrication devrait être facilitée puisque tous les éléments à assembler ont été identifiés et plusieurs architectures ont été soulevées. Cependant ce démonstrateur devra être accompagné d'un dossier de conception d'un manuel utilisateur et d'un plan de test fonctionnel sans quoi ce démonstrateur sera difficilement utilisable.

2) Essai sur le nouveau produit : on essaiera les fonctions du démonstrateur avant de l'implémenter dans un environnement d'accueil réel ou modélisé (dans notre cas beaucoup trop dangereux donc on se contentera d'un modèle). La liste d'exigence fonctionnelle servira de base de plan d'essai et on vérifiera que le système respecte bien chacune d'entre elle.

3) Outils d'analyse de performance et de tenue en environnement : Puis on envisagera l'implémentation et la tenue en environnement. On concevra à cette étape tous les outils, et les modèles qui nous serviront à tester le démonstrateur. Rappelons qu'un modèle est une approximation de la réalité. Un bon modèle est un modèle dont l'écart entre la réalité et le modèle n'est pas gênant pour la prise de décision donc que la décision reste bonne dans la réalité, (dans notre cas, les décisions reviennent à apporter des modifications à SAHARA).

4) Tests : On effectuera donc au sein de cet environnement modèle des tests de fonctionnalité, des tests de sécurité, des tests de sûreté de fonctionnement, des tests de fiabilité (tolérance aux fautes), et quelques tests de tenue en environnementaux (température pression, vieillissement, compatibilité électromagnétique)

On analysera l'ensemble des résultats/ performances révélés au cours de ces tests afin de procéder aux modifications requises dans le système. Une fois tous les changements réalisés on pourra passer aux tests en environnement à la qualification et à la certification. Cette étape ne fait pas parti de notre projet ainsi que les suivantes car il s'agissait là d'un projet de recherche et non d'un projet industriel mais la suite logique est l'ensemble des tests de certification réalisés par les autorités compétentes et les essais en vol.

5) Validation : on comparera les résultats attendus dans les exigences et les résultats des tests et on décidera de valider ou pas le système. Dans le cas où le système n'est pas validé, l'ensemble des exigences problématiques seront mises en exergue et le travail d'ajustement sera facilité.

6) Essais de production : on concevra les lignes de production d'où sortiront le système, puis nous réaliseront des essais sur les produits pour vérifier leur intégrité et en tirer des statistiques sur la vitesse de production, la qualité des produits sortant, le taux de produit défectueux etc ...)

7) Réalisation du produit à grande échelle en fonction du besoin du marché identifié (il ne s'agirait pas de produire du stock non souhaité)

8) Planification animation et contrôle de la vente : on optimisera la production en fonction de la vente et du succès du produit

Cette thèse, même si elle apporte d'une part un certain nombre de réponses sur l'introduction de réseaux sans fil dans les avions et d'autre part quelques éléments sur la méthode de conception d'un système innovant en combinant les aspects commerciaux, la dimension ingénierie système et des paramètres techniques, soulève des chantiers non exploités. En effet Il a fallu restreindre ce travail mais le système étudié ne pourrait par exemple pas exister sans une alimentation adaptée. Plusieurs pistes sont envisageables comme celle de l'énergie harvesting ou des batteries d'autonomie prolongée. Nous avons au cours de notre raisonnement fait des choix de modélisation mais comme pour toute modélisation et il n'existe pas qu'une seule solution. Certaines solutions sans fil, il y a 3 ans était encore immature mais néanmoins prometteuse et des progrès sont réalisés dans le domaine et il ne serait pas étonnant si la recherche débutait aujourd'hui de voir une sélection différente de technologie.

7. Bibliographie:

7.1. Ouvrage et articles:

[Aiguier]: Marc Aiguier Boris Golden, Daniel Krob Modeling of Complex Systems II: A minimalist and unified semantics for heterogeneous integrated systems [2011]

[Ajluni] : Cheryl Ajluni, "Following The WLAN Alphabet To Lower Power" [2009]

[Arnaud Groff], "100 questions sur "manager l'innovation", AFNOR,-[2009]

[Benferhat] : Sabri Benferhat, « Simulation des conditions de trafic intercellulaire d'un réseau sans fil en milieu industriel par un modèle de propagation composite » Doctorat en informatique de l'Université Blaise Pascal, [2009].

[Blanchard]: B.S. Blanchard and W J Fabrycky, Systems engineering and analysis. Fourth edition, United States Prentice Hall, Inc, Upper Saddle River, NJ (USA) [2006].

[Booher] H.R. Booher "handbook of human systems integration" John Wiley & Sons [2003]

[Chapanis] A. Chapanis "human factors in systems engineering" John Wiley & Sons [1996]

[Chipcon] : Chipcon – Texas Instruments, CC2420, "2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee-ready RF Transceiver", Data sheet

[Eisner] H. Einser "essentials of project and systems engineering management"

[Fache] Jacques Fache, Les Mutations industrielles, Belin. Collection Mémento. Géographie- [2006]

[Frenzel]: Louis E. Frenzel, Louis E. Frenzel, "Low Power Wi-Fi Breakthrough Offers Active RFID And Location Services" [2006]

[Gainspan] : Gainspan "FM Launches Low-Power WI-FI Sensor Networking Module with 5 year battery life", [2009]

[Gilb] : T. Gilb « competitive engineering » Elsevier [2005]

[Henderson] Henderson, Clark, Architectural innovation: The reconfiguration of existing product technologies and the failure of established firms, Administrative Science Quarterly- [1990].

[Honour]: E.C. Honour, Understanding the Value of Systems Engineering.

[Hook]: I. Hook "customer-center products: creating successful products through smart requirements management" Amacon [2000]

[Kahn] Kahn G., The semantics of a simple language for parallel programming, Proc. of the IFIP Congress 74, 471-475, [1974].

- [Kossiakov] A. Kossiakov and W. Sweet “systems engineering principles and practice” John Wiley & Sons [2006]
- [Krob01] : D. Krob, Eléments d'architecture des systèmes complexes, in "Gestion de la complexité et de l'information dans les grands systèmes critiques", A. Appriou, Ed., 179-207, CNRS Editions, [2009].
- [Krob02] : D. Krob, Enterprise Architecture, Modules 1-10, Ecole Polytechnique, [2009-2010]
- [Lecompte]: Celeste LeCompte, “Here Come Energy-Efficient Wi-Fi Devices”, [2008]
- [Lorenzi] Jean-Hervé Lorenzi, Alain Villemeur, L'Innovation au cœur de la nouvelle croissance, Économica, [2009]
- [Maier]: M.W. Maier and Eberhardt Rechtin, The art of systems architecting, third edition CRC press [2009]
- [Meinadier01] : J.P. Meinadier, Ingénierie et intégration de systèmes, Hermès, [1998].
- [Meinadier02] : J.P. Meinadier, Le métier d'intégration de systèmes, Hermès-Lavoisier, [2002].
- [Panchard] Jacques Panchard, Wireless sensor networks for marginal farming in India. Thèse EPFL, no 4172 Dir.: Jean-Pierre Hubaux [2008].
- [Prax] Jean-Yves Prax, Bernard Buisson et Philippe Silberzahn, Objectif Innovation, Dunod- [2005]
- [Rogers] Everett Rogers, Diffusion of Innovations- [2003]
- [Sage01] A.P. Sage, Systems Engineering Education, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C Application and Reviews, Vol. 30, [2000].
- [Sage02] A.P. Sage, Systems of Systems: Architecture Based Systems Design and Integration. IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, [2005].
- [Sage03] A.P. Sage and W. B. Rouse, Handbook of Systems Engineering and Management. Wiley series in systems engineering, second editions [2009].
- [Schumpeter] Joseph Schumpeter, Théorie de l'évolution économique- [1912]
- [Simpson] T. W. Simpson, Z. Siddique, and J. (R.) Jiao, Product Platform and Product Family Design: Methods and Applications, Springer, New York, [2005]
- [Studor]: NASA/JSC/George Studor , Fly-by-Wireless, A Revolution in Aerospace Vehicle Architecture for Instrumentation and Control
- [Tanenbaum] : Andrew Tanenbaum, Réseaux, Pearson, [2003]

[TREESWING] : il existe plusieurs version du “tree swing” elles ont évolué au fil du temps la première version serait apparu dans les années 60 mais la plus ancienne version retrouvée se trouve dans Total Quality Management de J Oakland, [1989].

[Wassons] Wasson, S. Charles “system analysis, design and development” John Wiley & Sons [2006]

[Weilkiens] T. Weilkiens, Systems Engineering with SysML / UML – Modeling, Analysis, Design. Morgan Kaufmann Publishers, [2008]

7.2. Standard

EIA/ANSI 632: processes for engineering a system [1994-1998]

IEEE 1220: standard for application and management of the systems engineering [1994-1998]

ISO/IEC 15288, NF Z 67-288 systems engineering-system life cycle processes [2002]

ISO/IEC TR 19760 systems engineering, a guide for the application of ISO/IEC 15288 [2003]

RG Aero 00040A recommandation générale pour la spécification de management de projet [2005]

[PESTEL]: PESTEL analysis of the macro-environment Political, Economic, Social, Technological, Environmental, Legal : Oxford University Press, 2007

7.3. Guides de référence

[AFIS]: SE working group, découvrir et comprendre l'ingénierie système [2006]

[NASA]: Stephen J. Kapurch, Systems Engineering Handbook [2010]

[INCOSE], Systems Engineering Handbook. A guide for system lifecycle processes and activities. International Council on Systems Engineering (INCOSE), San Diego, CA. [2010].

7.4. Normes:

[A5-SG-1-X-40-ASAI] : Edition 2 révision 4

[ARINC 404]: Air Transport Equipment Cases and Racking

[ARINC 600]: Air Transport Avionics Equipment Interfaces

[ARINC 601]: Control/Display Interfaces

[ARP 4754]: Safety process for component

[ARP 4761] : Safety process for design

[EUROCAE ED-12B / RTCA DO-178C]: Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification

[EUROCAE ED-14E / RTCA DO-160F]: Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment [2010]

[EUROCAE ED-80 / RTCA DO-254]: Design Assurance Guidance for Airborne Electronic Hardware [2000]

[SPX 902 A002 E01-F] : Exigences des environnements hélicoptère

[SPX240AV001E99] : issue B, Exigences pour interfaces réseau électrique hélicoptère

[TNX 001 AE009 E01] : Exigences de maintenabilité et Testabilité pour avionique hélicoptère

7.5. Projet et groupe d'étude:

[ASTRAL] : http://www.fnrae.org/1-39841-Detail-projet.php?id_theme=2&id_projet=6

[AUTOSENS] : http://www.fnrae.org/1-39841-Detail-projet.php?id_theme=2&id_projet=7

[FBW]: Fly by wireless <http://www.caneus.org>

[ITU]: International Telecommunication Union

<http://www.itu.int/ITUR/index.asp?category=terrestrial&mlink=frequency-plans&lang=en>

Worldwide frequency allotment plan for aeronautical mobile (OR) service in the band 3 025 - 18 030 kHz (Appendix 26)

[OCARI]: Khaldoun Al Agha, Marc-Henri Bertin, Tuan Dang, Alexandre Guitton, Pascale Minet, Thierry Val and Jean-Baptiste Viollet, "Which wireless technology for industrial wireless sensor networks? The development of OCARI technology", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 10, October 2009.

[SACER] : <http://spiderman-2.laas.fr/Club-Affilies/documents/Seminaire23-11-2006/PDF/pres-sace.pdf>

[WAIC]: <https://avsi-tees.tamu.edu/PublicWeb/WAICPublic/waic2.htm>

[WISE] : <http://www.wise-project.org/index.php?content=description>

7.6. Site internet :

[ITU] : <http://www.itu.int/fr/Pages/default.aspx>

[OSEO] : <http://www.oseo.fr/gmpi/oseo/pdf/methodologie.pdf>

[FUI]: <http://competitivite.gouv.fr/les-appels-a-projets-fui/les-appels-a-projets-de-r-d-dans-le-cadre-du-fui-fonds-unique-interministeriel-380.html>

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70632B.pdf>

<http://www.gainspan.com/docs2/GS1011-PB.pdf>

http://www.rovingnetworks.com/products/RN_XV

www.merl.com/reports/docs/TR2009-007.pdf

<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2540.p>

8. Publications et conférences

Etat de l'art du projet SAHARA (projet soutenant ma thèse) mars 2010: document interne au projet qui a permis de convaincre le comité du FUI lors de la deuxième présentation de SAHARA (1er présentation FUI 9 : décembre 2009 et 2iem présentation FUI 11: décembre 2010)

Coauteur : Pascale Minet, INRIA

Etude sécurité du projet NANOCOMM décembre 2010 : le projet NANOCOMM était un projet visant à rendre indépendant un crack wire (capteur de fissure) certaines problématiques étaient communes à SAHARA surtout concernant la sécurité.
Document interne au projet NANOCOMM réutilisé pour SAHARA

Annexe technique du projet SAHARA mars 2011 : document officiel publié lors du FUI n°11: ce document a servi à monter le projet et à lever les fonds nécessaires

Coauteur : Jean-Francois Perelgritz, EADS IW

Poster affiché à la conférence CSD&M (Complex Systems Design & Management), décembre 2011: How to use systems architecture to specify the operational perimeter of an innovative product line

Livrable 1 de SAHARA janvier 2012: Classification des Applications SAHARA document interne au projet à faire apparaitre dans le rapport aux financeurs tache 1 du lot1 et entrée 1 du lot 2

Coauteur : Gwenael Raguenes, Eurocopter et Hervé Bry, Astrium

Livrable 2 de SAHARA mars 2012: liste des exigences des utilisateurs document interne au projet à faire apparaitre dans le rapport aux financeurs tache 2 du lot1 et entrée 2 du lot 2

Coauteur : Gwenael Raguenes, Eurocopter ; Hervé Bry, Astrium et Michel Pons, CNES

Article accepté publié et présenté lors de la conférence internationale de l'INCOSEE à Rome, juillet 2012 : How to use systems architecture to specify the operational perimeter of an innovative product line

Coauteur : Daniel Krob- LIX, École polytechnique, 91128 Palaiseau, France

9. Annexe

9.1. Annexe 1 : état de l'art de la liste exhaustive des technologies considérées

9.1.1. La norme IEEE 802.15.1

La norme IEEE 802.15.1 spécifie les couches physiques et MAC pour des connexions sans fil avec des équipements fixes ou mobiles autour de la personne ou d'un objet. Elle vise des solutions peu chères, robustes, efficaces en énergie, supportées par une large gamme d'équipements. Cette norme est basée sur la technologie initialement développée par le groupe Bluetooth Special Interest Group.

9.1.1.1. Architecture

Au niveau physique, la norme IEEE 802.15.1 utilise la bande des 2.4GHz. Les 79 canaux RF sont numérotés de 0 à 78 et séparés par 1 MHz en commençant par 2 402 MHz. Le codage de l'information se fait par sauts de fréquence. Le saut de fréquence (technique utilisée FHSS, frequency hopping spread spectrum) permet de résister aux interférences et à l'atténuation. Pour réduire la complexité du transceiver, une modulation de fréquence binaire est utilisée. Le débit supporté est de 1Mbit/s. En fonctionnement normal, un canal radio est partagé par un groupe d'équipements synchronisés sur une horloge commune et une séquence de saut de fréquence. L'équipement qui fournit la référence de synchronisation est appelé *maître*, les autres équipements ses *esclaves*. Un tel groupe forme un *piconet*. Un maître peut gérer jusqu'à sept esclaves actifs et 255 esclaves parqués. La séquence de saut de fréquence est déterminée par certains champs de l'adresse du maître et son horloge. C'est une séquence pseudo-aléatoire des fréquences disponibles dans la bande ISM. Il est ainsi possible d'exclure les fréquences faisant l'objet d'interférences causées par d'autres réseaux à proximité. Le canal physique est subdivisé en slots de 625 microsecondes. Les paquets transmis entre équipements sont transmis dans ces slots. Un paquet peut occuper plusieurs slots. Le saut de fréquence n'est effectué qu'entre la transmission et la réception d'un paquet. Plusieurs piconets peuvent être interconnectés, formant alors un scatternet. La seule condition est qu'un nœud passerelle n'est maître d'aucun piconet.

Dans un piconet, la communication est effectuée sur un canal physique selon le mode TDD (Time Division Duplex). Il existe un lien physique entre le maître et chaque esclave, mais pas de lien physique direct entre deux esclaves. Les types de trafic supportés sont les trafics unicast synchrones, asynchrones ou isochrones ainsi que les trafics broadcast. Dans tous les cas, le trafic est soit émis par le maître, soit à destination du maître. L'accès au médium se fait sous le contrôle du maître. Chaque équipement dispose d'une adresse sur 48 bits, appelée *BD_ADDR* (Bluetooth Device Address). Ces adresses sont gérées par la [IEEE Registration Authority](#). Il existe trois classes de modules radio *Bluetooth*, sur le marché ayant des puissances différentes et donc des portées différentes :

| Classe | Puissance | Portée |
|--------|-----------------|-----------------|
| 1 | 100 mW (20 dBm) | 100 mètres |
| 2 | 2,5 mW (4 dBm) | 10 à 20 mètres |
| 3 | 1 mW (0 dBm) | Quelques mètres |

La plupart des fabricants d'appareils électroniques utilisent des modules de classe 2.

La figure 1 illustre l'architecture faisant apparaître l'interface standardisée, appelée HCI, Host Controller Interface, entre le contrôleur qui implémente les trois couches les plus basses (radio, bande de base et gestion de liaison) et l'hôte qui implémente la couche L2CAP et les couches supérieures. Comme le contrôleur est limité en buffers, la couche L2CAP doit se charger de la segmentation des unités de données utilisateur en unités de données protocole pouvant être elles-mêmes fragmentées en paquets.

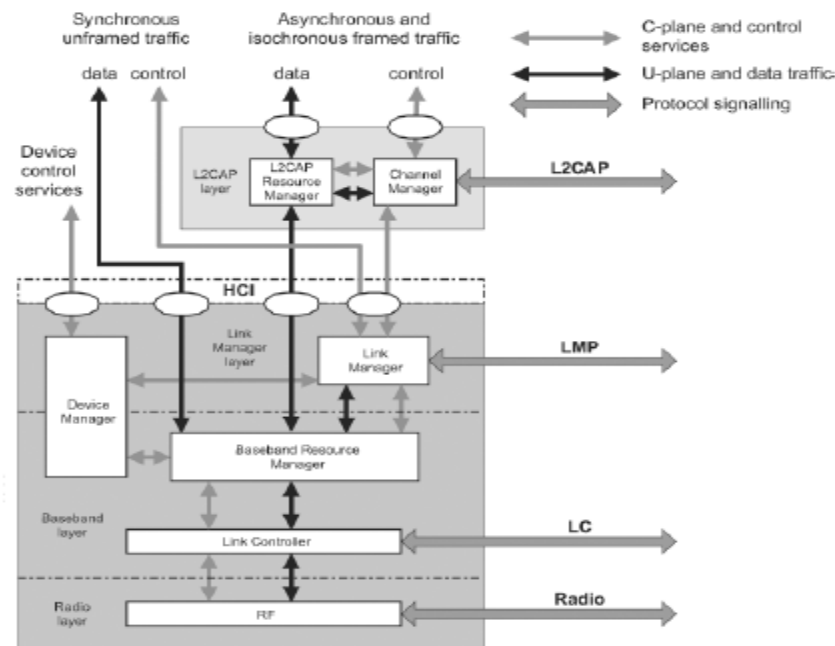


Figure 1 : Architecture avec séparation possible du contrôleur et de l'hôte.

9.1.1.2. La couche L2CAP

La couche L2CAP implémente le L2CAP Manager et le Channel Manager. Elle peut sur option fournir une fonctionnalité de détection/retransmission pour les données utilisateur demandant une certaine fiabilité. De même un mécanisme de contrôle de flux peut être utilisé pour contrôler la disponibilité des buffers chez le récepteur.

Le Channel Manager est responsable de la création, gestion et destruction des canaux L2CAP pour le transfert des messages. Il utilise L2CAP pour interagir avec le Channel Manager d'un équipement distant pour créer les canaux L2CAP demandés. Le Channel Manager interagit avec son local Link Manager pour créer les nouveaux liens logiques nécessaires et les configurer selon la qualité de service demandée par ce type de données à transférer.

Le L2CAP Resource Manager est chargé de veiller à ce que les canaux L2CAP avec des engagements de QoS (qualité de service) puissent accéder à un canal physique malgré les ressources limitées du contrôleur. Il est responsable de l'ordre dans lequel sont soumis les fragments d'unités de données de protocole à la couche bande de base. Il peut également se charger de la politique de mise en conformité des trafics.

9.1.1.3. *Le Device Manager*

Le Device Manager contrôle le comportement de l'équipement. Il se situe à la fois dans la couche Link Manager et dans la couche BaseBand. Il est responsable de toute opération non directement liée au transfert de données telle que la détection de la présence d'équipement voisin, la gestion du nom local de l'équipement, la gestion des clés des liens. Pour ce faire, il demande l'accès au médium au Baseband Resource Manager.

9.1.1.4. *La couche Link Manager :*

Elle comprend le Link Manager (LM).

Le Link Manager est responsable de la création, modification, et libération des liens logiques ainsi que la mise à jour des paramètres associés aux liens physiques. Pour ce faire, il communique avec un LM distant en utilisant le protocole LMP.

LMP permet la création de nouveaux liens logiques entre équipements. Initialement, seul un lien de type ACL est créé entre un esclave et le maître du piconet, les autres liens sont créés à la demande. LMP permet également de contrôler les paramètres des liens logiques (données cryptées, adaptation de la puissance de transmission, paramètres de QoS).

9.1.1.5. *La couche Baseband*

La couche BaseBand regroupe le BaseBand Resource Manager et le Link Controller.

Le BaseBand Resource Manager gère l'accès au médium physique. Il gère l'accès au médium dans les slots temporels conformément au type d'accès qui a été négocié.

Le Link Controller est chargé d'encoder et décoder les paquets qui lui sont soumis. Il véhicule la signalisation utilisée pour le contrôle de flux, les acquittements et retransmissions. L'interprétation et le contrôle de cette signalisation sont à la charge du BaseBand Resource Manager.

9.1.1.6. *La couche Radio: Radio Frequency (RF)*

Le bloc RF est chargé de transmettre et recevoir des paquets sur le canal physique. La couche Baseband peut contrôler le timing et la fréquence de la porteuse. Quatre canaux physiques sont définis :

- deux canaux physiques, le canal basique et le canal adapté, sont associés à un piconet et utilisés pour communiquer entre équipements connectés à ce piconet ;
- un canal physique pour découvrir les équipements : inquiry scan channel ;
- un canal physique pour connecter les équipements : page scan channel.

9.1.1.7. *Les services de transfert offerts à l'utilisateur*

Nous distinguons les services de transfert suivants, illustrés par la figure 2 :

- ACL : Asynchronous Connection-Oriented utilisés pour un transfert point-à-point, bidirectionnel, fiable ou temps contraint. C'est le lien par défaut qui est créé lors de la connexion de l'équipement au piconet. C'est aussi sur ce lien qu'est véhiculée la signalisation LMP. Si l'équipement est parqué, il perd tous ses liens et en particulier

son lien ACL par défaut. Il demeure cependant synchronisé au piconet. Les données utilisateur sont découpées en paquets de 1, 3 ou 5 slots.

- SCO : Synchronous Connection-Oriented utilisés pour un transfert point-à-point, bidirectionnel audiovisuel, symétrique et à débit constant de 64 kbit/s ; des slots fixes et réservés sont utilisés pour transmettre des paquets de taille fixe périodiquement sans retransmission possible.
- eSCO : Extended Synchronous Connection-Oriented utilisés pour un transfert point-à-point, bidirectionnel, symétrique ou asymétrique, avec des données régulières et des retransmissions limitées pour des données à débit constant synchronisées sur l'horloge du maître ; ce service est plus flexible que le précédent (ex. : possibilité de retransmission)
- ASB : Active Slave Broadcast utilisés pour des diffusions non fiables aux seuls équipements synchronisés sur le canal physique du piconet dans les groupes L2CAP ;
- PSB : Parked Slave Broadcast utilisés pour des diffusions non fiables à tous les équipements du piconet. ils véhiculent le trafic LMP et L2CAP destiné aux équipements parqués et par les demandes d'accès provenant des équipements parqués.

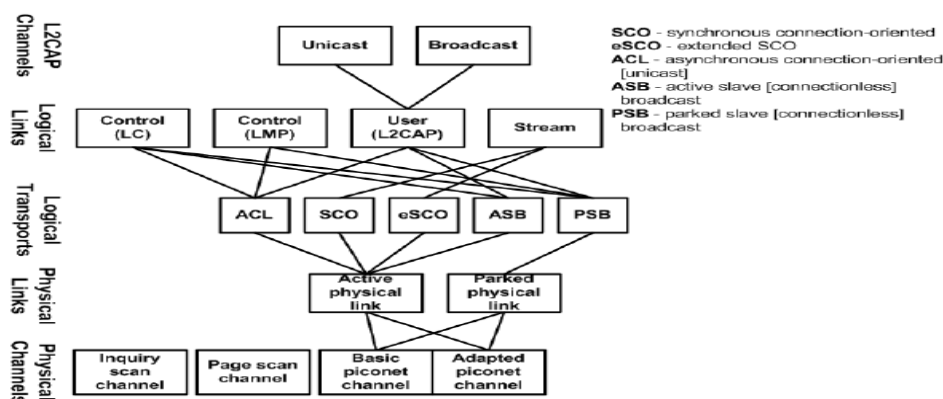


Figure 2: Hiérarchie des entités chargées d'assurer les différents services.

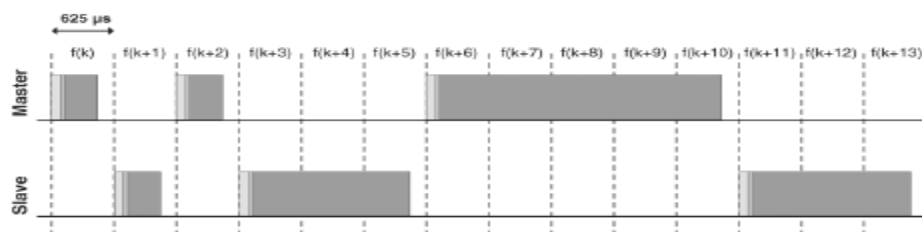


Figure 3 : Succession de paquets émis par le maître et un esclave.

La taille des paquets émis sur un lien ACL est de 1, 3 ou 5 slots ; les slots sont de 625μs.

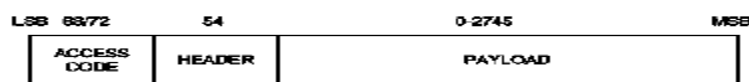


Figure 4 : Format d'un paquet de taille maximum 2745 bits.

9.1.2. La norme IEEE 802.15.3

La norme IEEE 802.15.3 spécifie les couches MAC et physique pour des réseaux radio sans fil de type WPAN (équipements fixes ou mobiles autour de la personne ou d'un objet) à haut débit (11 à 55 Mbit/s). Elle a été conçue pour le transfert de fichiers audio et vidéo en streaming. Cette norme dispose de capacités accrues en termes de portée, de bande passante et de débit de connexion. Elle est compatible avec les autres normes 802.15 pour réseaux WPAN (réseaux personnels sans fil).

9.1.2.1. Description

En se basant sur les précédents appels pour applications collectés pour le groupe 802.15, un nombre significatif d'applications ne peut pas être adressé par le 802.15.1. Des débits élevés sont nécessaires pour des applications dépendant du temps ou des applications de transfert de fichiers volumineux sans sacrifier les critères de simplicité d'implémentation, de coût bas et d'une faible consommation d'énergie.

Un débit minimal de 20Mbit/s a été proposé pour ce type d'applications.

Cette norme vient pallier les insuffisances de partage de la bande passante des précédentes normes. Le 802.15.3 peut en effet admettre jusqu'à 245 connexions simultanées et procure un débit de 55 Mbps (contre 1 Mbps auparavant) pour une distance de connexion de 100 mètres environ. Diffusée sur la fréquence 2,4 GHz, cette norme semble d'autant plus performante qu'elle assure l'immunité aux interférences causées par les autres types de réseaux, ce qui lui permettra de coexister avec les normes de type Wi-Fi (802.11x), 802.15x et Bluetooth.

Il est possible, par exemple, que plusieurs débits soient supportés pour différentes applications utilisateurs. Par conséquent, les notions de coût, de bande de fréquence, de performance, d'énergie et de débit ont été prises en compte lors du développement de ce standard.

9.1.2.2. Architecture du réseau

L'IEEE 802.15.3 définit un réseau avec une architecture en piconets.

Un piconet est un système de communication sans fil en mode ad hoc permettant à un certain nombre de nœuds (*Independent Data Devices* (DEVs)) de communiquer entre eux. Un piconet se distingue des autres types d'architecture réseau dans le fait que les communications sont normalement confinées à une petite zone autour d'une personne ou d'un objet. Cette zone couvre, typiquement, une distance maximale de 10 mètres dans toutes les directions et couvre la personne ou l'objet qu'il soit stationnaire ou en mouvement. Un piconet 802.15.3 consiste en plusieurs composants comme illustré dans Figure 5.

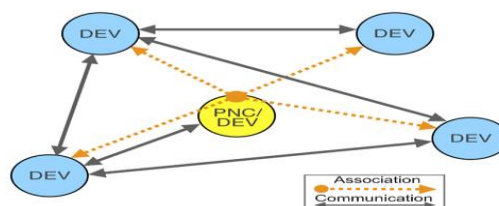


Figure 5 : Type de liaison dans un piconet.

Le composant basique est le DEV. Dans chaque piconet, un DEV est amené à assumer le rôle de coordinateur de piconet (PNC). Le PNC fournit le timing de référence pour le piconet grâce aux transmissions de la trame beacon. De plus, le PNC gère les besoins de QoS, le mode d'économie d'énergie ainsi que le contrôle d'accès au piconet.

Etant donné que les piconets 802.15.3 se forment sans planification préalable et seulement pour un temps limité, ce type de réseau est considéré comme un réseau ad hoc.

Le standard permet à un DEV de demander la formation d'un piconet subsidiaire. Le piconet initial est référencé comme le piconet parent et le piconet subsidiaire est référencé comme le piconet fils ou le piconet voisin selon la méthode utilisée par le DEV pour s'associer avec le PNC. Le piconet fils ou voisin peut être référencé aussi comme un piconet dépendant puisque il se base sur le PNC du piconet initial pour l'allocation du temps d'accès au canal. Un piconet indépendant est un piconet qui ne possède pas de piconets dépendants.

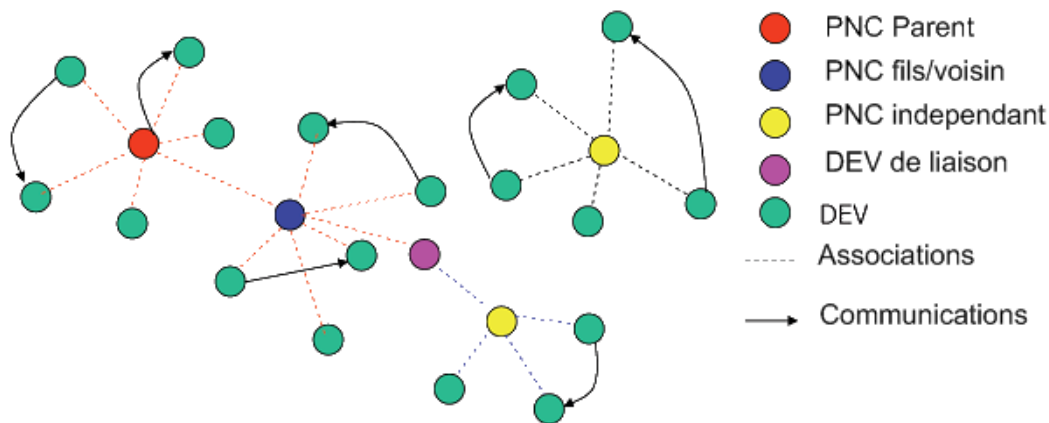


Figure 6 : Architecture en piconets.

9.1.2.3. L'accès au canal de communication

Le temps du canal est divisé en une succession de Superframes commençant chacune par une trame beacon.

Une Superframe est composée de 3 parties majeures: le beacon, la CAP (Contention Access Period) et la CTAP (Channel Time Allocation Period).

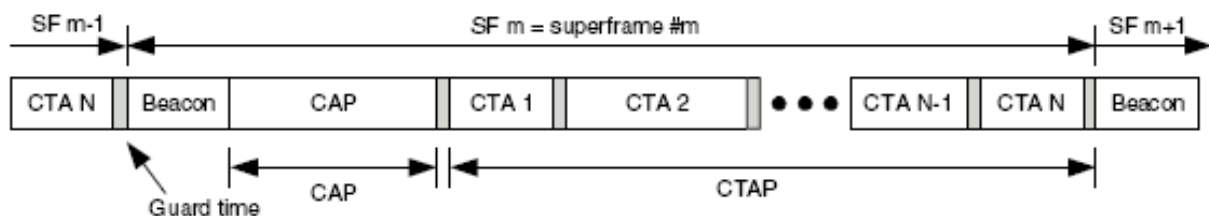


Figure 7 : Structure d'une Superframe.

La CTAP est utilisée pour les flux de données asynchrone ou isochrone alors que la CAP peut être utilisée pour transmettre des commandes ou des données (*non-stream data*).

Durant la CAP les nœuds sont en compétition pour accéder au canal en utilisant l'algorithme CSMA/CA. Cependant, durant la CTAP, le PNC contrôle l'accès au canal en assignant des CTAs (Channel Time Allocation) à un nœud (DEV) ou à un group de nœuds, chaque CTA possède un temps de début et une durée fixe.

Le PNC contrôle le type de données ou commandes transmises durant la CAP grâce à une information transmise dans la trame beacon.

Un DEV ne doit transmettre, pour la Supertrame en cours, que des trames du type spécifié par le PNC dans la trame beacon. Le PNC peut changer le type de trames pouvant être transmises durant la CAP d'une Supertrame à une autre.

Afin de minimiser les collisions, avant de transmettre un DEV doit effectuer une écoute du canal (CCA) afin de détecter si le canal est libre ou non. Durant la CAP, un DEV n'est autorisé à transmettre qu'une seule trame à la fois, avec une écoute du canal avant chaque transmission de trame.

L'IEEE 802.15.3 offre de plus une qualité de service accrue, puisqu'il inclut le protocole TDMA (*Time Division Multiple Access*). Ce dernier permet de gérer les connexions simultanées en fonction de la bande passante disponible afin d'optimiser les transferts et d'éviter les encombrements de réseau. En effet, durant la CTAP l'accès au canal se base sur une technique TDMA dans laquelle chaque CTA possède un début et une durée garanties, ce qui permet de réduire la consommation d'énergie ainsi que garantir de bonnes caractéristiques de QoS.

Un DEV possédant un CTA peut ou non utiliser tout le temps qui lui est alloué. La sélection du flux, commande ou données asynchrone à transmettre localement par le DEV, est fonction du nombre de trames en attente dans la file et de leur priorité.

Il existe deux types de CTA: dynamique et pseudo statique. Le PNC a la possibilité de bouger un CTA dynamique à l'intérieur de la Supertrame permettant ainsi de réarranger les CTAs afin d'optimiser leur assignation.

9.1.2.4. La communication entre nœuds

Afin de pouvoir manipuler des trames volumineuses des couches supérieures, la couche MAC a la possibilité de fragmenter et défragmenter ces trames ce qui permet de réduire le FER (*Frame Error Rate*) en réduisant la taille des trames.

Si un nœud (DEV) veut vérifier la bonne réception d'une trame, l'une des trois politiques d'acquiescement est utilisée :

- Pas d'acquiescement (No-ACK policy) : pas de garantie de bonne réception de la trame.
- Acquiescement immédiat (Imm-ACK policy) : chaque trame est acquiescée séparément.
- Acquiescement retardé (Dly-ACK policy) : Permet à la source de transmettre plusieurs trames sans recevoir d'acquiescement. Les acquiescements individuels sont groupés en une seule trame d'acquiescement envoyée à la demande de la source. Ce type d'acquiescement permet de réduire le trafic sur le canal tout en permettant à la source de vérifier la bonne réception des trames transmises.

Si le DEV source ne reçoit pas d'acquittement alors il a la possibilité de retransmettre la trame ou d'abandonner la transmission de la trame.

La décision de retransmettre ou d'abandonner la transmission d'une trame dépend du type de données transmises, du type de commande, du nombre de retransmissions, du temps d'attente dans la file...etc.

9.1.2.5. La couche physique

La couche physique 802.15.3 opère sur la bande entre 2.4 GHz et 2.4835 GHz, généralement qualifiée de bande libre (émission/réception sans licence). Deux plans de canaux ont été définis, le premier plan comporte 4 canaux pour des applications à haute densité et le deuxième plan comporte 3 canaux permettant une meilleure coexistence avec les réseaux IEEE 802.11b.

Puisque deux canaux des deux plans se chevauchent, il y a au total 5 canaux de communication.

| Id du canal | Fréquence centrale | Haute densité | Coexistence 802.11b |
|-------------|--------------------|---------------|---------------------|
| 1 | 2.412 GHz | X | X |
| 2 | 2.428 GHz | X | |
| 3 | 2.437 GHz | | X |
| 4 | 2.445 GHz | X | |
| 5 | 2.462 GHz | X | X |

La couche physique supporte 5 débits différents allant de 11 à 55 Mbit/s. Une transmission en débit de base (22 Mbit/s) n'est pas codée alors que les transmissions en débits de 11, 33, 44 et 55 Mbit/s sont codées grâce à une modulation codée en treillis.

| Type de modulation | Codage | Débit (Mbit/s) |
|--------------------|---------------|----------------|
| QPSK | TCM à 8 états | 11 |
| DQPSK | Pas de codage | 22 |
| 16-QAM | TCM à 8 états | 33 |
| 32-QAM | TCM à 8 états | 44 |
| 64-QAM | TCM à 8 états | 55 |

9.1.3. La norme IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 peut travailler sur trois bandes de fréquences différentes : 868 MHz pour la région Europe, 915 MHz pour l'Amérique du Nord, et 2,4 GHz pour une couverture mondiale. La norme prévoit deux couches physiques différentes (PHY), une pour le 868/915 MHz (PHY868/915) et une seconde pour le 2,4 GHz (PHY2450).

Au total, 27 canaux (numérotés de 0 à 26) sont répartis sur ces trois bandes. Cette diversité en terme d'utilisation du spectre radiofréquence permet à la technologie de répondre aux nombreuses réglementations et d'être utilisable sur toutes les régions du globe mais aussi de s'adapter aux environnements pollués (fours à micro-onde, appareils RF, WiFi, Bluetooth...). Actuellement, les premiers produits disponibles utilisent majoritairement la bande 2.4 GHz.

IEEE 802.15.4 prévoit une portée classique de quelques dizaines de mètres. La puissance maximale émise par un module 802.15.4 n'est pas définie par la norme, celle-ci est laissée d'une part à l'appréciation de l'autorité de régulation de la zone où est effectuée la transmission, et d'autre part au constructeur pour des questions d'autonomie énergétique. Néanmoins, la puissance typique recommandée est de 1 mW, soit 0 dBm et la sensibilité du récepteur doit être meilleure que - 85 dBm à 2,4 GHz (pour un taux d'erreur paquet meilleur que 1 %).

Le couche liaison spécifié par le standard IEEE 802.15.4 décrit un format de trame générique et les champs qui la composent : en-tête MAC (MHR, *MAC HeadeR*), données MAC (MSDU : *MAC Service Data Unit*) et pied de trame MAC (MFR : *MAC FootR*). Les champs sont les suivants :

- le contrôle de trame (2 octets) : permet d'identifier le type de trame (donnée, balise acquittement ou commande), le mode d'adresse, la demande ou non d'acquittement, etc. ;
- le numéro de séquence (1 octet) : octet permettant la numérotation de chaque trame ;
- l'adressage (1 à 20 octets) : contient les adresses source et destination de la trame ;
- les données : les données utiles (typiquement un datagramme réseau), 127 octets au maximum;
- la séquence de contrôle (2 octets) : un CRC (Code de Redondance Cyclique)

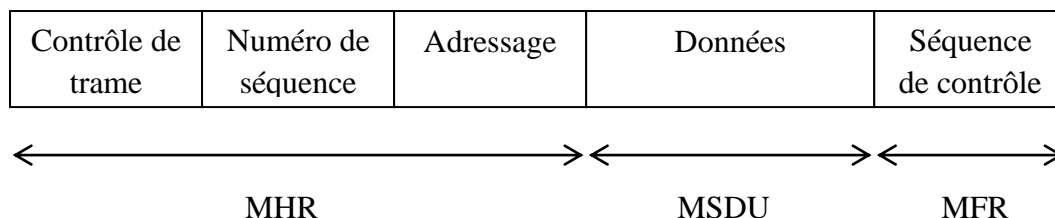


Figure 8: Format d'une trame MAC IEEE 802.15.4.

9.1.4. La famille de norme IEEE 802.11

La famille IEEE 802.11 spécifie un contrôle d'accès au médium et plusieurs couches physiques pour pouvoir connecter en sans fil des équipements fixes, portables ou mobiles dans une zone locale donnée. Elle utilise des techniques de modulation qui utilisent le même protocole de base. Les plus populaires sont les protocoles 802.11b, et 802.11g qui utilisent la bande de fréquence des 2,4GHz. C'est pourquoi les nœuds 802.11 peuvent parfois souffrir des interférences causées par les fours micro-ondes, les téléphones sans fil et les équipements Bluetooth. Alors que Bluetooth utilise le saut de fréquence FHSS, le 802.11b et le 802.11g utilisent respectivement, la signalisation DSSS, direct sequence spread spectrum signaling et la méthode OFDM, orthogonal frequency division multiplexing. Le 802.11a utilise la bande des 5GHz, offrant 19 canaux distincts. La sécurité a été renforcée dans le 802.11i. Le 802.11n propose une nouvelle technique de modulation multi-streaming. Les autres standards de la famille (c-f, h, j) sont des amendements.

Les principaux amendements qui modifient de manière significative les techniques de transmission utilisées sont les suivants :

| Protocole | Date de normalisation | Fréquence | Débit max | Portée en intérieur | Portée en extérieur | |
|-------------------------|-----------------------|--|-----------|---------------------|---------------------|--|
| Legacy | 1997 | 2.4-2.5 GHz | 2 Mbit/s | | | |
| 802.11a | 1999 | 5.15-5.35/ 5.47-5.725/ 5.725-5.875 GHz | 54 Mbit/s | ~25 m | ~75 m | Permet d'obtenir un haut débit (54 Mbps théoriques, 30 Mbps réels). Spécifie 8 canaux radio dans la bande des 5 GHz. |
| 802.11b | 1999 | 2.4-2.5 GHz | 11 Mbit/s | ~35 m | ~100 m | La norme la plus répandue. Propose un débit théorique de 11 Mbps (6 Mbps réels) avec une portée ≤ 300 m en extérieur. 3 canaux radio dans la bande des 2.4 GHz |
| 802.11g | 2003 | 2.4-2.5 GHz | 54 Mbit/s | ~25 m | ~75 m | Offre un haut débit (54 Mbps théoriques, 30 Mbps réels) sur la bande de fréquence des 2.4 |

| | | | | | | |
|-------------------------|------|----------------|------------|-------|---------|--|
| | | | | | | GHz. Compatibilité ascendante avec la norme 802.11b : des matériels conformes à la norme 802.11g peuvent fonctionner en 802.11b |
| 802.11n | 2009 | 2,4GHz ou 5GHz | 540 Mbit/s | ~50 m | ~125 m | |
| 802.11y | 2008 | 3.7 GHz | 54Mbit/s | ~50 m | ~5000 m | |

Il existe aussi des amendements concernant principalement la couche MAC du standard:

| Amendement | Date de publication | Description |
|-------------------------|---------------------|---|
| 802.11c | | Modification de la norme 802.1d afin de pouvoir établir un pont avec les trames 802.11 (niveau <i>liaison de données</i>). |
| 802.11d | 2001 | Supplément à la norme 802.11 dont le but est de permettre une utilisation internationale des réseaux locaux 802.11. Elle consiste à permettre aux différents équipements d'échanger des informations sur les plages de fréquence et les puissances autorisées dans le pays d'origine du matériel. |
| 802.11e | 2005 | Vise à donner des possibilités en matière de qualité de service (QoS) au niveau de la couche <i>liaison de données</i> . Permet de définir les besoins des différents paquets en terme de bande passante et de délai de transmission de telle manière à permettre notamment une meilleure transmission de la voix et de la vidéo. |
| 802.11f | | Recommandation à l'intention des vendeurs de point d'accès pour une meilleure interopérabilité des produits. Elle propose le protocole <i>Inter-Access point roaming protocol</i> permettant à un utilisateur itinérant de changer de point d'accès de façon transparente lors d'un déplacement, quelles que soient les marques des points d'accès présentes dans l'infrastructure réseau. Cette possibilité est appelée <i>itinérance</i> (ou <i>roaming</i>) |

| | | |
|-------------------------|------|--|
| 802.11h | 2003 | Décrit des mécanismes permettant de mesurer et d'abandonner les canaux afin de respecter leurs conditions d'utilisations locales (notamment nécessaires pour l'utilisation de la bande ISM à 5 GHz en Europe). |
| 802.11i | 2004 | Améliore la sécurité des transmissions (gestion et distribution des clés, chiffrement et authentification). Cette norme s'appuie sur l'AES (<i>Advanced Encryption Standard</i>) et propose un chiffrement des communications pour les transmissions utilisant les technologies 802.11a, 802.11b et 802.11g. |
| 802.11j | 2004 | Décrit les modifications nécessaires à l'utilisation des bandes de fréquences à 4.9 GHz et 5 GHz en conformité avec la régulation japonaise. Est à la réglementation japonaise ce que le 802.11h est à la réglementation européenne. |

En 2007, la plupart des principaux amendements à la norme 802.11 ([a](#),[b](#),[d](#),[e](#),[g](#),[h](#),[i](#),[j](#)) ont été directement intégrés dans la norme et sont disponibles sous la forme d'un unique document .

9.1.4.1. Topologie

La figure ci- après illustre les différents composants 802.11. On distingue deux types de nœuds :

- les points d'accès, notés PA sur la figure, gère l'association des autres nœuds ;
- les nœuds autres, encore appelés stations, notées STA sur la figure.

Un BSS, Basic Service Set comprend un point d'accès éventuel (i.e ; pas de point d'accès en mode ad hoc) et les stations qui lui sont associées. Le Distribution System, DS, est chargé d'interconnecter différents points d'accès et de former ainsi un réseau étendu.

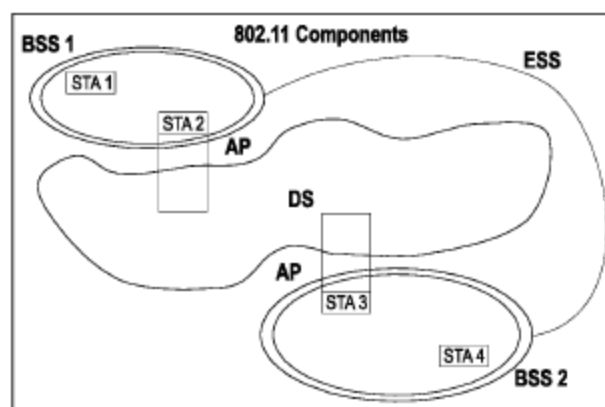


Figure 9 : Les différents composants d'un réseau 802.11.

9.1.4.2. *Services offerts*

Les services offerts permettent de :

- transférer des données utilisateur entre nœuds : ces services sont :
 - service de distribution invoqué à chaque émission/réception de données ;
 - service d'association permet à un nœud de connaître son point d'accès ;
 - service de réassociation, utilisé en cas de mobilité ou changement de topologie ;
 - service de désassociation pour terminer une association existante ;
- contrôler l'accès au médium et assurer la confidentialité ; ces services sont :
 - l'authentification utilisée pour remplacer la connexion filaire, est fournie au niveau deux entre deux nœuds voisins ;
 - la confidentialité des données.
- gérer la bande de fréquence ; ces deux services utilisés avec la bande des 5GHz sont :
 - transmit power control (TPC)
 - dynamic frequency selection (DFS).
- supporter des applications avec des contraintes de QoS par le biais de la différenciation de services au niveau de l'accès au médium et la spécification des types de trafic avec leurs contraintes de QoS ;
- offrir une synchronisation temporelle précise aux applications (ex. flux audio ou vidéo).

9.1.4.3. *Les trames 802.11*

Pour fournir ces services, différents types de trame sont utilisés :

- les trames de données qui contiennent des données fournies par la couche supérieure.
Une trame MAC peut avoir jusqu'à 4 champs d'adresse. L'adresse 1 est celle du récepteur, l'adresse 2 de l'émetteur, l'adresse 3 est utilisée comme filtre par le récepteur.

- les trames de contrôle facilitent l'échange de trames de données entre nœuds. Citons à titre d'exemple:
 - les trames d'acquittement (ACK) : après avoir reçu une trame de données, le récepteur acquitte l'émetteur s'il n'a détecté aucune erreur. Si l'émetteur ne reçoit pas un acquittement dans un intervalle de temps donné, il retransmet sa trame jusqu'à concurrence d'un nombre maximum de transmissions.
 - les trames Request to Send (RTS): les trames RTS et CTS sont utilisées pour réduire les collisions causées par les nœuds caches. L'envoi du RTS est la première étape avant l'envoi des données.
 - les trames Clear to Send (CTS): Un nœud répond à une trame RTS par une trame CTS. Il permet ainsi au nœud émetteur du RTS d'envoyer ses données. Le CTS inclut une durée Durant laquelle toute station hormis le destinataire du CTS s'abstient de transmettre.
- Les trames de gestion assurent la maintenance. Citons à titre d'exemple :
 - les trames d'authentification où un nœud envoie une demande d'authentification à son point d'accès. La procédure dépend du type d'authentification utilisé. A l'issue de cette procédure, le point d'accès accepte ou refuse.
 - les trames de demande d'association émises par un nœud pour permettre au point d'accès d'allouer les ressources et synchroniser le nœud.
 - les trames de réponse d'association émises par un point d'accès vers un nœud pour indiquer l'acceptation ou le refus d'association.
 - la trame de beacon émise périodiquement par le point d'accès pour annoncer sa présence et fournir divers paramètres du réseau.
 - la trame de désauthentification émise par un nœud voulant terminer sa connexion.
 - la trame de désassociation émise par un nœud voulant terminer sa connexion.
 - la trame de demande de sonde émise par un nœud demandant des informations à un autre nœud.
 - la trame de réponse de sonde émise par un point d'accès en réponse à une demande d'un autre nœud.
 - la trame de demande de réassociation émise par un nœud qui n'est plus à portée de son point d'accès courant.
 - la trame de réponse de réassociation émise par un point d'accès contenant l'acceptation ou le rejet de la réassociation demandée par un autre nœud .

9.1.5. Le standard ZigBee

ZigBee cible les réseaux sans fil utilisés pour la télé-surveillance et les applications de contrôle. Il se veut offrir une solution simple, fiable, et de faible coût pour des réseaux à faible débit et faible consommation énergétique. ZigBee est promu par la ZigBee Alliance, une alliance d'industriels. La technologie ZigBee vise une très large gamme d'équipements (i.e. tout équipement usuel susceptible de communiquer en sans fil) ainsi que plus généralement les marchés industriels, commerciaux et gouvernementaux.

ZigBee s'appuie sur le standard IEEE 802.15.4 pour les couches physique et MAC. Il propose une couche réseau qui offre le routage multisaut et une couche application.

9.1.5.1. Topologies

Selon les spécifications MAC IEEE 802.15.4, il existe trois types d'équipements qui sont spécifiés dans ZigBee:

- ZigBee Coordinateur (MAC Network Coordinator). Maintient la connaissance globale du réseau; le plus sophistiqué des trois types et donc celui qui consomme le plus de mémoire et d'énergie ;
- ZigBee Routeur (MAC Full Function Device): supporte la fonctionnalité complète spécifiée dans IEEE 802.15, peut router des paquets pour les autres nœuds.
- ZigBee Terminal (MAC Reduced Function Device): ne supporte qu'une fonctionnalité limitée pour réduire le coût et la complexité. Cet équipement ne peut pas router des paquets pour d'autres.

Les différentes topologies rencontrées dans ZigBee sont au nombre de trois : mesh, étoile et cluster tree. Elles sont illustrées dans la figure suivante.

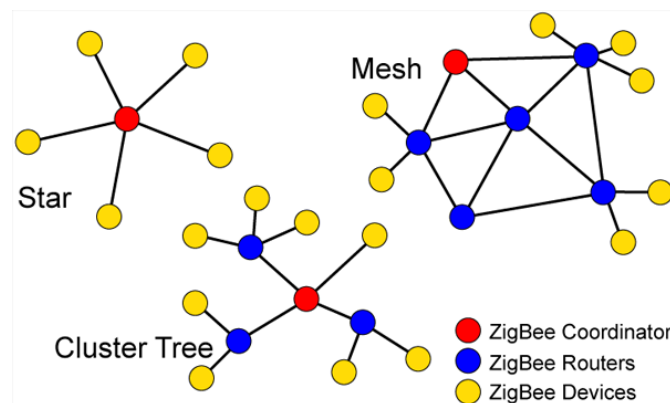


Figure 10 : Topologies ZigBee.

Pour des réseaux en étoile, ZigBee peut fournir une latence de l'ordre de 16ms dans un réseau avec beacon en utilisant des timeslots garantis pour se protéger des interférences pouvant être créées par d'autres capteurs.

L'espace d'adressage permet d'atteindre jusqu'à:

- 2^{64} équipements en mode étendu, chacun disposant d'une adresse sur 64 bits;
- 2^{16} équipements en mode local, chacun disposant d'une adresse sur 16 bits.

La norme IEEE 802.15.4 fournit des services d'authentification, cryptage, et intégrité permettant aux développeurs d'appliquer les niveaux de sécurité requis: pas de sécurité, listes de contrôle d'accès, et chiffrement AES 32-bit à 128-bit avec authentification. C'est au développeur que revient le choix du meilleur compromis : niveau de sécurité versus consommation énergétique, et capacité de traitement. La sécurité ZigBee permet de gérer à distance la sécurité du réseau sans fil (ex. gestion des clés de sécurité).

9.1.5.2. Stack ZigBee

La stack ZigBee est représentée sur la figure 11. On retrouve au niveau des deux premières couches la norme IEEE 802.15.4. La ZigBee Alliance a ajouté une couche Réseau et une couche Application incluant le support de l'application, l'objet ZigBee (ZigBee Device Object) et les objets application définis par le constructeur.

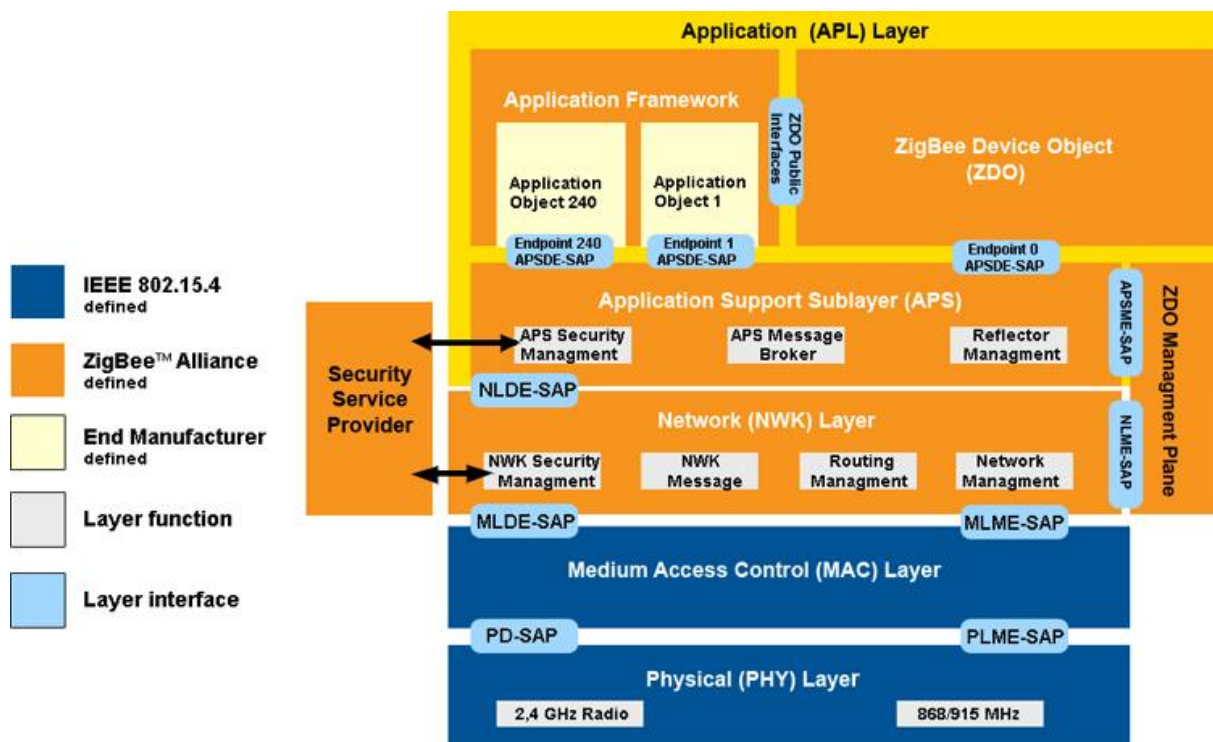


Figure 11 : Stack ZigBee.

La couche Réseau permet à un équipement de joindre/quitter le réseau, appliquer le niveau de sécurité requis aux paquets et de les router vers leur destination finale. De plus, la découverte et la maintenance des routes sont à la charge de cette couche, ainsi que la découverte des voisins à un saut et le stockage d'information pertinente les concernant. C'est la couche Réseau du coordinateur qui est responsable de créer un nouveau réseau et d'assigner de nouvelles adresses aux équipements qui viennent s'associer.

La couche Application inclut la sous-couche APS, le ZDO et les objets application définis par le constructeur. La sous-couche APS maintient les tables pour les associations permettant à deux équipements associés de s'entendre sur leurs besoins et services et d'échanger des messages. Le ZDO définit le rôle des équipements dans le réseau (ex. : ZigBee coordinateur ou terminal), découvre les équipements présents sur le réseau et détermine les services applicatifs qu'ils fournissent, a l'initiative ou répond aux requêtes d'association et établit une relation sécurisée entre équipements.

La pile protocolaire ZigBee est petite en comparaison des autres standards sans fil. Pour des équipements terminaux avec des capacités limitées, la pile protocolaire ne demande que 4Kbits de mémoire. L'implémentation complète de cette pile prend 32Kbits de mémoire. Le coordinateur du réseau a besoin de davantage de mémoire pour gérer la base de données des équipements et les tables d'association.

9.1.5.3. Profils ZigBee

Un profil d'équipement ZigBee, ou profil d'application, est un ensemble de descripteurs d'équipements décrivant la vue que l'application a de ces équipements. Les profils sont développés par les vendeurs de la technologie ZigBee pour adresser des besoins technologiques spécifiques. Ils sont un moyen pour d'une part unifier des solutions techniques interopérables au sein du standard ZigBee et pour d'autre part focaliser sur un marché donné.

Les Profils de pile protocolaire désignent un ensemble de valeurs de paramètres utilisées dans la pile protocolaire et agréées pour fournir l'interopérabilité dans des marchés spécifiés. Dans la version v1.0, les profils de pile protocolaire identifiés étaient :

- Domotique – application pour éteindre/allumer l'éclairage.
- Automatisation.
- Contrôle industriel.

Si l'on désire mettre en place un équipement pouvant se connecter à un réseau ZigBee, il y a trois possibilités :

- Soit faire partie de la ZigBee Alliance et donc bénéficier de ses apports technologiques, notamment concernant cette pile protocolaire de communication.
- Soit reprendre un produit développé par l'un des membres de la ZigBee Alliance et disposer de la stack, spécifique à ce produit, développée par le constructeur choisi.
- Soit développer sa propre stack en accord avec les dernières spécifications disponibles. Si ce développement est effectué à des fins commerciales, il devra être validé par la ZigBee Alliance.

9.1.6. Le standard Bluetooth

Bluetooth est une technologie sans fil standardisée pour échanger des données à courte distance entre équipements fixes ou mobiles dans le cadre des réseaux personnels sans fil (WPAN) avec de hauts niveaux de sécurité. Créée par Ericsson en 1994, elle se voulait une alternative aux câbles RS-232. Le standard Bluetooth est géré par le Bluetooth Special Interest Group.

Afin d'assurer une compatibilité entre tous les périphériques *Bluetooth*, la majeure partie de la pile de protocoles est définie dans la spécification. La figure suivante illustre la pile protocolaire BlueTooth. Il est à noter que les couches basses sont développées en hardware, tandis que les couches hautes sont développées en software. L'interface HCI fournit une méthode uniforme pour accéder aux couches matérielles. Son rôle de *séparation* permet un développement indépendant du matériel et du logiciel. HCI permet un transfert de données à débit maximum, soit 720 kbit/s pour la norme 1.2, et un débit trois fois plus élevé pour la norme 2.0+EDR.

Les protocoles de transport suivants sont supportés :

- [*Universal Serial Bus*](#) (USB) ;
- [*PC-Card*](#) ;
- [*RS-232*](#) ;
- [*UART*](#).

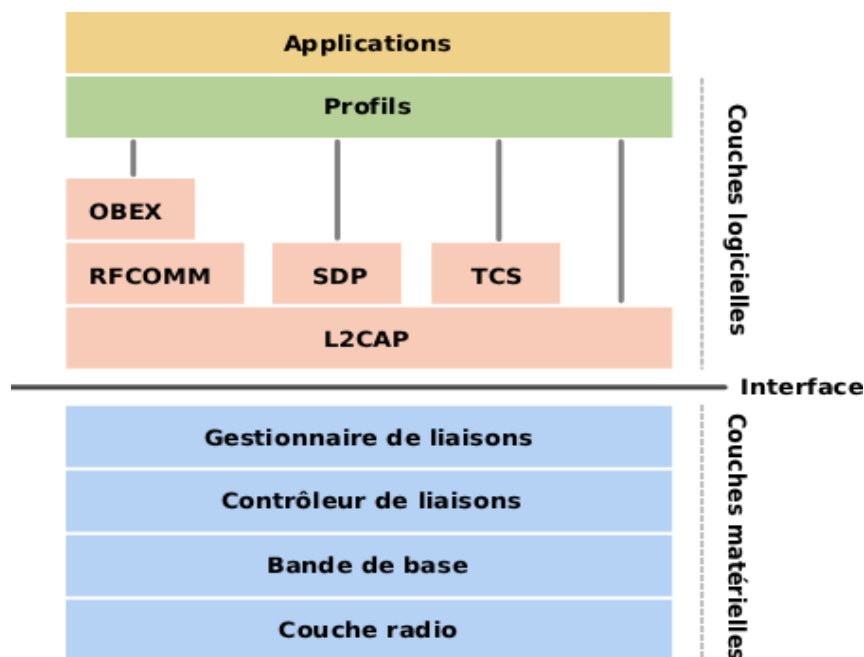


Figure 12 : La pile protocolaire BlueTooth.

9.1.6.1. Les profils

Un profil correspond à une spécification fonctionnelle d'un usage particulier. Les profils peuvent également correspondre à différents types de périphériques. Les profils ont pour but d'assurer une **interopérabilité** entre tous les appareils *Bluetooth*. Ils définissent :

- la manière d'implémenter un usage défini
- les protocoles spécifiques à utiliser
- les contraintes et les intervalles de valeurs de ces protocoles

Les différents profils sont :

1. GAP : *Generic Access Profile*
2. SDAP : *Service Discovery Application Profile*
3. SPP : *Serial Port Profile*
4. HS Profile : *Headset Profile*
5. DUN Profile : *Dial-up Networking Profile*
6. LAN Access Profile : ce profil est maintenant obsolète ; il est remplacé par le profil PAN
7. Fax Profile
8. GOEP : *Generic Object Exchange Profile*
9. SP : *Synchronization Profile*
10. OPP : *Object Push Profile*
11. FTP : *File Transfer Profile*
12. CTP : *Cordless Telephony Profile*
13. IP : *Intercom Profile*
14. [A2DP](#) : *Advanced Audio Distribution Profile* (profil de distribution audio avancée)
15. AVRCP : *Audio Video Remote Control Profile* (Commande à distance)
16. HFP : *HandsFree Profile*
17. PAN : *Personal Area Network Profile*
18. VDP : *Video Distribution Profile*
19. BIP : *Basic Imaging Profile*
20. BPP : *Basic Printing Profile*
21. SYNC : *Synchronisation Profile*
22. SAP : *SIM Access Profile*
23. PBAP : *PhoneBook Access Profile*
24. HIDP : *Human Interface Device Profile*

Deux types d'implémentation BlueTooth peuvent être distingués:

- Les implémentations générales qui mettent l'accent sur la flexibilité et la richesse des possibilités visent les PCs. Le support de profils BlueTooth supplémentaires est possible par l'ajout de drivers.
- Les implémentations pour systèmes embarqués qui sont contraintes par des ressources limitées. Des exemples sont fournis par les périphériques BlueTooth.

9.1.7. Bluetooth basse énergie

En juillet dernier, Bluetooth SIG a formellement annoncé l'adoption de *Bluetooth Core Specification Version 4.0* incluant la technologie *Bluetooth* basse énergie. Cette nouvelle technologie, consommant beaucoup moins d'énergie (voir le tableau ci-après) est particulièrement adaptée aux équipements disposant de batterie bouton tels que les montres et les jouets. Il existe deux implémentations possibles de Bluetooth basse énergie :

- en mode dual, la fonctionnalité Bluetooth basse énergie est intégrée dans un contrôleur Bluetooth classique.
- en mode unique pour des équipements fortement intégrés et compacts fonctionnant sur batterie, dont la durée de vie visée est d'un an. Elle offre alors un mode idle consommant très peu, une découverte simple des équipements, un transfert point à multipoint fiable à faible consommation et des connexions sécurisées à moindre coût.

Les premiers produits Bluetooth basse énergie seront disponibles d'ici la fin de l'année.

Le tableau ci-dessous compare les versions classique et basse énergie de Bluetooth.

| | Bluetooth classique | Bluetooth basse énergie |
|---|---|--|
| Fréquence radio | 2,4GHz | 2,4GHz |
| Portée radio | 200m | 100m |
| Débit max | 1-3Mb/s | 1Mb/s |
| Esclaves actifs | 7 | Non défini; dépend de l'implémentation |
| Sécurité | 64/128-bit et définie par l'utilisateur | 128-bit AES with Counter Mode CBC-MAC et définie par l'utilisateur |
| Robustesse | Saut de fréquence rapide, FEC et Fast ack | Saut de fréquence rapide, Lazy Ack, 24-bit CRC, 32-bit Message Integrity Check |
| Latence (à partir d'un état non connecté) | 100ms | 6ms |
| Temps total pour émettre données | 100ms | 3ms |
| Certification | SIG Bluetooth | SIG Bluetooth |
| Transfert de voix | Oui | Non |

| Topologie | Scatternet | Etoile-Bus |
|--------------------------|--|---|
| Consommation énergétique | 1 comme référence | 0.01 to 0.5 |
| Pic de consommation | <30 mA | <20 mA |
| Découverte de service | Oui | Oui |
| Concept de profil | Oui | Oui |
| Exemples d'utilisation | Téléphones mobiles, jeux, PCs, streaming audio, santé, sport, sécurité, industrie, etc | Téléphones mobiles, jeux, PDAs, santé, sport, domotique, automatisme, industrie, etc. |

9.1.8. Le standard ISA100

ISA100 est un standard ouvert de technologies réseaux sans fil [ISA100.11a, 2009]. Il concerne les systèmes sans fil pour l'automatisation industrielle, et plus particulièrement le contrôle de process et les applications qui y sont liées.

L'objectif principal d'ISA100 est de fournir un standard unique pour les réseaux sans fil, permettant d'utiliser plusieurs protocoles et plusieurs applications. Le domaine d'ISA100 est le niveau terrain au travers d'un LAN. Le champ applicatif visé concerne surtout les applications non critiques de surveillance (de type alerte, ou de type monitoring), et dans une moindre mesure les applications de contrôle ou de sûreté. ISA100 est particulièrement adapté aux applications de monitoring périodique, et au contrôle de process lorsque des délais de 100 ms sont tolérables.

De manière générale, ISA100 offre les caractéristiques suivantes : des temps de latence supérieurs à 100 ms, la possibilité pour certains équipements d'avoir une faible consommation énergétique, le passage à l'échelle des équipements, la robustesse et la résistance aux interférences en environnement industriel sévère. ISA100 assure la coexistence avec de nombreux protocoles sans fil tels que WiFi (802.11x), WiMAX (802.16x), Bluetooth, WirelessHART, etc. ISA100 fournit aussi des services de sécurité.

9.1.8.1. Architecture et topologie

ISA100 possède une architecture comportant un réseau filaire appelé l'épine dorsale, et un (ou plusieurs) réseau(x) sans fil. ISA100 utilise plusieurs types d'entités : les routeurs de l'épine dorsale, les passerelles, les équipements sur piles avec possibilités de routage (que nous nommerons FFD), les équipements sur piles sans possibilité de routage (que nous nommerons RFD), et les capteurs sur piles. Les équipements sur piles peuvent être fixes ou mobiles.

Les routeurs de l'épine dorsale sont interconnectés entre eux et avec les passerelles au travers de l'épine dorsale. Parmi les routeurs de l'épine dorsale (ou les passerelles), se trouvent des routeurs ayant les fonctionnalités de gestion du système et de gestion de la sécurité. Toutes les autres entités sont des équipements sans fil et sur piles. Ces équipements s'auto-organisent

selon les deux topologies permises dans ISA100 : la topologie en étoile et la topologie maillée.

Dans une topologie en étoile, tous les équipements sont associés à un FFD ou à une passerelle, via un seul saut. Cette topologie est privilégiée lorsque le délai est la métrique principale.

Dans une topologie maillée, les RFD et les capteurs s'associent chacun à un ou plusieurs FFD. Les FFD s'associent chacun à d'autres FFD et à des passerelles. Cette topologie est privilégiée lorsque la fiabilité est la métrique principale. En effet, les données peuvent suivre plusieurs chemins, ce qui permet de lutter contre les ruptures de liens sans fil.

9.1.8.2. Couches basses (physique et MAC)

ISA100 se base sur les couches basses définies dans 802.15.4 (norme 2006) à 2.4 GHz. Cette couche physique offre un débit théorique de l'ordre de 250 kbps. Comme 802.15.4, ISA100 utilise un mécanisme d'acquittements et de retransmissions pour lutter contre les pertes, et un mécanisme d'écoute du canal pour éviter les collisions.

ISA100 construit une nouvelle couche liaison de données au-dessus de la couche MAC de 802.15.4. Cette couche liaison de données est responsable de la gestion de la topologie, du saut de fréquences, et de la sécurité à un saut.

Le saut de fréquences est utilisé pour lutter contre les interférences, et pour favoriser la coexistence avec d'autres protocoles fonctionnant dans la même bande de fréquences.

La sécurité à un saut permet d'éviter les attaques venant d'agents extérieurs au réseau. Elle est réalisée au moyen de clés qui peuvent être symétriques ou asymétriques. La sécurité à un saut fournit des services de confidentialité, d'intégrité et d'authentification. Ces services peuvent être fournis indépendamment.

9.1.8.3. Couches intermédiaires (réseau et transport)

ISA100 se base sur le protocole réseau IPv6, et sur les protocoles de transport TCP et UDP.

ISA100 fournit un mécanisme de sécurité de bout en bout, permettant de garantir l'authentification, la confidentialité et l'autorisation. Ces services peuvent être réalisés indépendamment. Ils protègent contre les agents internes disposant des clés du système, et pouvant donc intercepter les communications sécurisées à un saut.

9.1.8.4. Couches hautes (application)

ISA100 permet le déploiement de plusieurs applications et profils applicatifs. ISA100 définit une unique couche applicative supportant le tunneling. ISA100 présente aux applications supérieures des points d'entrée applicatifs auxquels il est possible de se connecter.

En pratique, les informations qui parviennent à la couche transport sont démultiplexées au niveau de la couche applicative d'ISA100, qui les redirige vers le point d'entrée applicatif correspondant.

9.1.9. Le standard WirelessHart

WirelessHart est un standard industriel qui vise à assurer une solution sans fil pour les réseaux de capteurs sans fil utilisés dans des applications ayant de fortes contraintes temporelles. WirelessHart a adopté un mécanisme de sauts de fréquences qui lui permet de résister aux interférences et aux effets des obstacles qui sont deux caractéristiques essentielles d'un environnement industriel.

La pile protocolaire d'un réseau WirelessHart est constituée de 5 couches : une couche physique, une couche MAC, une couche réseau, une couche transport et une couche application. Une entité spécifique appelée *Network Manager* prend en charge la constitution des tables de routage des nœuds du réseau et le séquençement des échanges TDMA.

Un réseau WirelessHart est constitué essentiellement de 4 éléments : Les entités capteurs ou actionneurs, une entité mobile appelée *Handheld* responsable de la configuration et du calibrage des autres entités, une passerelle qui connecte les entités du réseau de capteurs aux postes de contrôle et de surveillance, et le *Network Manager* qui est responsable de la configuration du réseau, de son séquençement et de la gestion des communications entre les différentes entités.

9.1.9.1. La couche physique :

La couche physique est celle de la norme IEEE 802.15.4. Le débit est de 250 kbits/s dans la bande de fréquences ISM 2400-2483,5 MHz. Ceci permet d'utiliser 16 canaux différents séparés de 5 MHz entre eux.

9.1.9.2. La couche MAC :

Par-dessus cette couche physique, contrairement à ZigBee, WirelessHart a défini la couche MAC en adoptant une méthode TDMA et un mécanisme de sauts de fréquences qui nécessitent une synchronisation globale du réseau. L'accès TDMA assure des envois déterministes et sans collision. Des slots de temps de 10 ms chacun sont regroupés en *superframes* périodiques.

Le network manager envoie à tous les nœuds du réseau un tableau qui leur donne la fréquence à utiliser durant un slot donné. L'administrateur du réseau est capable d'interdire l'utilisation des fréquences affectées par de fortes interférences, cette liste de fréquences s'appelle *blacklist*.

9.1.9.3. Les couches réseau et transport :

Au niveau 3, WirelessHart assure un routage mesh qui tente d'éviter les obstacles. Le network manager envoie à l'ensemble des nœuds du réseau un graphe qui indique tous les liens possibles dans le réseau. Chaque nœud du réseau est capable de jouer le rôle d'un routeur.

Deux protocoles de routage sont définis dans WirelessHart : Un routage par graphe où chaque nœud sur le chemin vers la destination finale calcule le prochain saut, et un routage par source où la source du paquet spécifie le chemin complet dans l'entête.

9.1.9.4. La couche application :

Le rôle de la couche application est essentiellement de définir les différentes commandes, réponses et les différents types de données. A la réception d'une commande durant une communication entre la passerelle et une autre entité, la couche application récupère le contenu et génère une réponse.

9.1.9.5. La sécurité :

WirelessHart emploie 2 niveaux de sécurité : une sécurité saut par saut au niveau de la couche MAC en utilisant les MIC (*Message Integrity Code*) basé sur CCM* (*Counter with CBC-MAC*) mode avec AES 128, et une sécurité de bout en bout au niveau de la couche réseau en utilisant 4 types de clés :

- les clés publiques, utilisées par les entités souhaitant rejoindre le réseau pour générer les MIC.
- les clés de réseau, partagées par toutes les entités déjà associées au réseau pour générer les MIC.
- les clés de *Join*, uniques par entité et utilisées par les nouvelles entités pour s'authentifier auprès du Network Manager.
- les clés de session, uniques par communication de bout en bout et générées par le Network Manager pour assurer la confidentialité et l'intégrité des données.

9.1.10. La norme 6LoWPan

Jusqu'à peu, l'utilisation du protocole IP sur des réseaux sans fil embarqué était considérée comme non viable. En effet, il était très difficile d'adapter le protocole IP pour opérer sur des microcontrôleurs et sur des liaisons à basse consommation d'énergie.

L'émergence du standard 6LoWPAN de l'IETF pour des communications IP sur des liaisons radio à faible puissance a changé la donne.

9.1.10.1. Le besoin d'une alternative IP:

Un des avantages du protocole IP est qu'il est fortement adopté dans le milieu commercial, possède un cycle de développement assez rapide et assure une interopérabilité entre les équipements des différents constructeurs.

IP est facile à intégrer et assure une interopérabilité mondiale, cependant, le protocole suscite des interrogations concernant les failles de sécurité qu'il pourrait comporter. De plus, IP était considéré comme inapproprié pour une utilisation dans des réseaux embarqués sans fil parce que la taille du protocole ne pouvait pas être réduite pour opérer sur des microcontrôleurs ou des liaisons à faible puissance tel que l'IEEE 802.15.4.

Les paquets IEEE 802.15.4 sont de petite taille et la pile protocolaire entière doit tenir dans un espace mémoire assez réduit (architecture embarquée). Cependant, le bénéfice d'opérer sur un protocole IP au lieu d'opérer directement sur un type de lien particulier devient apparent lorsqu'on s'intéresse à l'interconnexion des réseaux et à leur interopérabilité.

De plus, le WiFi (IEEE 802.11) s'est imposé comme le réseau sans fil dominant pour les ordinateurs, les ordinateurs portables, les PDA...etc. Une fois la sécurisation de la liaison sans

fil mise en place grâce au WPA (*WiFi Protected Access*), cette technologie a connu une forte pénétration dans les environnements industriels. Cependant, en raison de sa consommation d'énergie très élevée, le WiFi a été adopté pour des équipements alimentés en électricité ou rechargeables quotidiennement.

En 2007, l'IETF a complété le standard 6LoWPAN (RFC 4944) pour des communications IPv6 sur un lien IEEE 802.15.4. Ce standard permet d'étendre les communications IP à des équipements à faible consommation d'énergie et géographiquement dispersés.

6LoWPAN est un standard qui fournit un schéma de compression des entêtes IP afin de permettre l'encapsulation d'un paquet IP dans la trame de la couche MAC.

9.1.10.2. Architecture protocolaire

L'architecture protocolaire est définie en couches. Le protocole IP réside au niveau de la couche 3 permettant à une variété d'applications d'utiliser une variété de liens de communication pouvant être offerts par différentes technologies physiques et MAC.

Les applications se trouvent à un niveau très élevé d'abstraction et utilisent des protocoles de transport (principalement TCP ou UDP) afin d'acheminer leurs données et ce, sans se préoccuper du type de liaison utilisée.

Cette indépendance du lien physique offerte par le protocole IP est la raison principale de sa pertinence et de son taux de pénétration.

Afin de migrer les réseaux de capteurs des PAN (*Personal Area Network*) vers LoWPAN (*Low-power Wireless Personal Area Network*) l'IEEE a défini en 2003 le standard 802.15.4. Ce standard spécifie la couche MAC et physique pour la création de réseaux personnels sans fil à faible débit et à faible consommation d'énergie.

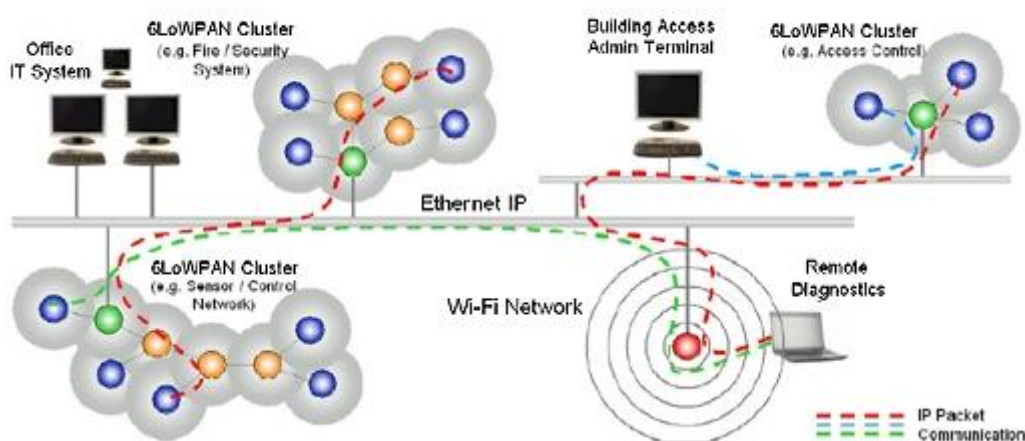


Figure 13 : Intégration des réseaux 6LoWPAN avec les réseaux existants.

Actuellement, il existe des réseaux de capteurs sans fil mais qui ne se basent pas sur le protocole IP tel que ZigBee. 6LoWPAN permet à un nœud capteur de communiquer en IP en

plaçant une couche d'adaptation au dessus de la couche MAC IEEE 802.15.4 afin de réaliser des fonctions de fragmentation/défragmentation, compression des entêtes IP, TCP et UDP.

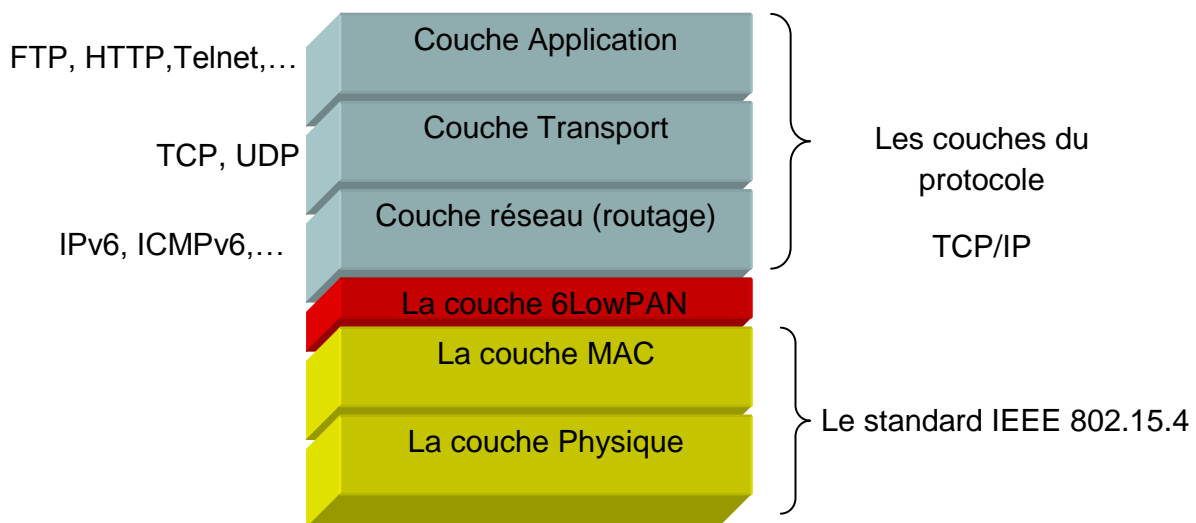


Figure 14: Position de la couche d'adaptation 6LoWPAN.

Le groupe 6LoWPAN de l'IETF a été chargé de définir la façon de transporter des paquets IP sur des trames IEEE 802.15.4 tout en assurant une interopérabilité avec les autres réseaux IP existants.

Ce standard permet aux nœuds 6LoWPAN, en plus de communiquer entre eux, de communiquer avec les ordinateurs et les périphériques IP déjà existants. Ainsi, le besoin de passerelles complexes et spécifiques aux applications est éliminé. De plus, les standards basés sur le protocole IP qui ont été développés durant des années afin de fournir des communications sécurisées peuvent être réutilisés.

Malheureusement, l'utilité du protocole IP n'est pas totalement gratuite, les paquets IP contiennent des adresses longues, des entêtes trop volumineux pour être contenues dans une trame IEEE 802.15.4 de 127 octets. Afin de rendre possible les communications IPv6 sur des liaisons 802.15.4, le groupe de travail 6LoWPAN a suggéré l'ajout d'une couche d'adaptation entre la couche IP et la couche MAC et qui permet d'effectuer une compression des entête IP, TCP et UDP et la fragmentation des paquets IP.

Pour la compression de l'entête IP, 6LoWPAN définit un schéma de compression pour les communications IPv6 de type lien local. Les informations pouvant être déduites de l'entête de la couche liaison sont tout simplement supprimées de l'entête IP, par exemple : les adresses source et destination. Les champs ne pouvant pas être déduits sont compressés en quelques bits afin de réduire au maximum la taille de l'entête.

La fragmentation est un autre mécanisme fourni par la couche d'adaptation 6LoWPAN. Quand le paquet IPv6 dépasse la taille du champ donnée de la trame MAC, les paquets sont fragmentés à la source et réassemblés à la destination.

Dans le but de supporter la transmission de paquets IPv6 sur la couche liaison, la couche d'adaptation peut utiliser des adresses du niveau liaison. Alternativement, la couche IPv6 peut se baser sur cette capacité pour réaliser un routage intra-PAN.

Pour accomplir une transmission multi sauts, 6LoWPAN définit l'entête Mesh. L'entête Mesh est utilisé afin de standardiser la façon d'encoder le champ « hop limit » ainsi que les adresses MAC source et destination du paquet.

Le standard 6LoWPAN permet d'insérer des entêtes à la demande selon les besoins. La figure ci-dessous présente les entêtes pouvant être insérés par la couche d'adaptation.

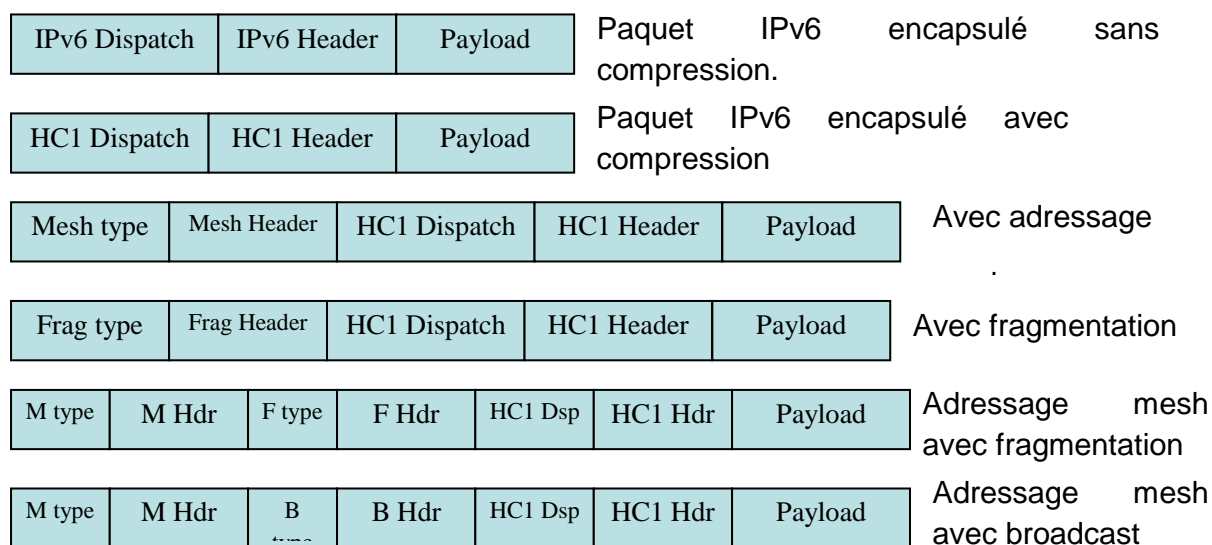


Figure 15 : Formats de paquets 6LoWPAN.

9.1.11. WiFi Low Power

WiFi désigne aujourd'hui une solution « Réseau Local Sans Fil » (WLAN) qui a évolué selon différentes versions depuis une vingtaine d'années. Si l'on retient le débit, la portée et la consommation comme paramètres essentiels pour parler des différentes étapes de cette évolution, nous pouvons constater certaines tendances, celles qui nous intéressent le plus ici sont relatives à la consommation.

A l'origine, cette gamme de solutions réseau est née de la norme IEEE 802.11 qui a évolué par amendements ou a été remplacée par de nouvelles versions comme 802.11a, 802.11b, 802.11n... WiFi représente à l'origine une certification d'interopérabilité, avec le temps ce mot désigne plus globalement ce type de réseaux.

9.1.11.1. Concernant le débit :

A l'origine le débit instantané était de 1 et 2 Mbits/s, la version 802.11b a permis dans la même bande de fréquences de passer à 11 Mbits/s ce qui reste une grandeur représentative de l'offre, ce débit est toujours pratiqué aujourd'hui. La version 802.11n est beaucoup plus ambitieuse à ce niveau car le débit instantané s'exprime en centaine de Mbits/s. Rappelons que d'une part le débit peut s'adapter aux conditions de propagation (Notamment chuter quand la distance entre les stations augmente) et que d'autre part, les chiffres donnés ici pour

le débit instantané servent à définir une bande passante qui est partagée entre les stations (Ainsi pour un réseau à 11 Mbits/s une station ne dispose au mieux que de la moitié de ce débit et beaucoup moins si ce réseau est chargé). La tendance est donc d'aller vers des débits de plus en plus importants notamment en changeant le mode de modulation.

9.1.11.2. Concernant la portée.

Si nous laissons à la solution la capacité d'adapter son débit aux circonstances, les deux grandeurs typiques à retenir sont jusqu'à 300 m en extérieur non obstrué et de l'ordre de quelques dizaines de mètres en intérieur (50 m par exemple). Les conditions de propagations en intérieur étant à la fois variables et complexes, exprimer une limite représentative n'a pas de sens : l'environnement peut se comporter comme un guide pour l'onde radio (effet de canyon, pour un couloir par exemple) ou comme un écran (effet d'ombre, pour une machine outil en métal). Sauf aménagements particuliers, ces deux chiffres restent représentatifs à travers les évolutions des solutions WiFi. Ceci s'explique par le fait que ces normes supportent une couverture cellulaire (3 canaux indépendants pour 802.11b, 8 pour 802.11a qui offre 54 Mbits/s mais moins de portée). Dans ce cas, des cellules trop grandes offriraient moins de bande passante aux stations du réseau. La portée n'est donc généralement pas un véritable objectif.

9.1.11.3. Concernant la consommation.

C'est le paramètre critique dès qu'il s'agit de considérer WiFi comme une solution potentielle pour des réseaux de capteurs.

Il est possible de distinguer aujourd'hui trois tendances quand il s'agit de juger des progrès dans ce domaine. Rappelons qu'un des principes des télécommunications peut se résumer à : La capacité de décodage d'une information reçue d'une onde radio est fonction du rapport de l'énergie reçue par bit (ou par symbole) sur l'énergie du bruit dans la bande passante considérée. Il est rare de pouvoir agir sur le bruit radio ambiant, une augmentation de débit se traduit donc le plus souvent par une augmentation de la puissance émise donc de la consommation de la solution.

9.1.11.4. Tendance impulsée par les smartphones

Une tendance forte vient du marché très tonique des smartphones. Dans ce domaine le challenge de la consommation est couplé avec celui de l'encombrement de la solution. Il faut à la fois réduire les puissances manipulées et le nombre de composants. Pour ce faire Broadcom a mis au point un composant composite (a combo device) qui, par le biais de mise en commun de modules, est capable de supporter soit LP WiFi soit BT (Bluetooth). Il s'agit du BCM4329. Cette stratégie a été aussi suivie par Atheros, qui a une solution combo équivalente avec son composant AR9002WB-1NGB.

Les chiffres sur la consommation ne sont pas facilement accessibles, néanmoins le challenge n'étant pas d'offrir du bas débit avec une autonomie exprimée en années. Cette piste n'a pas beaucoup d'intérêt dans l'univers des réseaux de capteurs.

9.1.11.5. Tendance impulsée par la version n

Les objectifs et les innovations de la version n de 802.11 sont composites. Cette version intègre à la fois de nouvelles modulations, des optimisations protocolaires (Technologie MIMO, concaténation de trames,...) et l'économie d'énergie n'est pas la principale priorité. Il est évoqué à plusieurs reprises dans la littérature qu'un point d'accès 802.11 n consomme plus qu'un a/b/g. Les efforts de consommation sont là pour amortir le surcoût en énergie demandé par les innovations en débits, portée, etc.

Nous pouvons retenir l'idée qu'il s'agit de consommer, avec cette nouvelle version, pas plus qu'avec les anciennes moins performantes selon d'autres critères. Là encore, l'objectif ne coïncide pas avec les ambitions généralement associées aux réseaux de capteurs.

9.1.11.6. Tendance impulsée par le marché des réseaux de capteurs.

Depuis 2009, l'idée de réutiliser la technologie WiFi dans un mode dégradé en débit pour les réseaux de capteurs fait son chemin et des composants dédiés à ce type d'applications sont annoncés. Des efforts pour économiser l'énergie sont faits à partir de la version 802.11b, la solution repose sur un état de sommeil particulièrement sobre, une activité d'émission très peu fréquente et des débits instantanés offerts limités à 1 ou 2 Mbits/s. L'ambition en termes d'autonomie est généralement annoncée par une durée de vie de 5 ans.

De telles solutions ont été proposées par G2 Microsystems pour des stations dont la production de données est plutôt de type périodique. Des durées de vie de plusieurs années à partir d'une pile AA sont envisagées si les données sont produites toutes les 40 secondes par exemple. Cette espérance est entretenue à partir d'un niveau très faible de consommation dans l'état « sleep » (10 μ A).

Il en est de même pour RF Monolithics, Inc qui a annoncé le WSN802G : un composant WiFi travaillant à 1 ou 2 Mbits/s (compatible avec les versions b et g de WiFi) et intégrant un état actif et un état sommeil optimisés en énergie. L'ambition étant une autonomie maximale estimée à 5 ans.

9.1.12. WiDom

Dans les réseaux filaires, les messages peuvent être organisés efficacement en utilisant le bus CAN. Le CAN possède une couche MAC qui permet des transmissions sans collisions et permet d'implémenter une priorité pour l'émission des messages. Ainsi, il est possible, connaissant les caractéristiques du message (période, temps de transmission, gigue...etc.), de calculer le délai maximum d'un message, en l'absence de perte.

Ce protocole de niveau MAC appartient à une famille de protocole appelé protocole à bit dominant. L'émission d'une trame commence par l'émission de son identifiant d'objet. Les collisions sont résolues par un principe de « bit dominant » : si une station émet un '1' pendant qu'une autre émet un '0', c'est le '0' qui est transmis sur le support. La station qui a émis le 1 voit qu'elle n'est pas seule, qu'elle n'est pas la plus prioritaire et cesse d'émettre.

Un nœud dépile le message de plus haute priorité se trouvant dans sa pile et effectue le tournoi. Si le nœud perd, il continue d'écouter le canal afin de savoir qui a gagné le droit de transmettre et pour recevoir le message qui lui est éventuellement destiné.



9.2. Annexe 2 : applications capteurs candidate

9.2.1. LI : faible débit à l'intérieur de l'avion

| Application | Type of Benefit | Net peak data rate per data-link / (kbps) | Node Quantity | Activity period | New or Existing Application |
|--|--|---|---------------|--|-----------------------------|
| Cabin Pressure | Wire reduction | 0.8 | 11 | ground, takeoff, cruise, landing | Existing |
| Engine sensors | Wire reduction, maintenance enhancement | 0.8 | 140 | ground, takeoff, cruise, landing | Existing |
| Smoke sensors (unoccupied areas) | wire reduction, maintenance enhancement, safety enhancements | 0.1 | 30 | ground, takeoff, cruise, landing, taxi | Existing |
| Smoke sensors (occupied areas) | wire reduction, flexibility enhancement safety enhancements | 0.1 | 130 | ground, takeoff, cruise, landing | Existing |
| Fuel tank/line sensors | wire reduction, safety enhancements, flexibility enhancements, maintenance enhancement | 0.2 | 80 | ground, takeoff, cruise, landing, taxi | Existing |
| Proximity sensors, passenger & cargo doors, panels | wire reduction, safety enhancements, operational enhancements | 0.2 | 60 | ground, takeoff, cruise, landing, taxi | Existing |
| Sensors for valves & other mechanical moving parts | wire reduction, operational enhancements | 0.2 | 100 | ground, takeoff, cruise, landing, taxi | Existing |
| ECS sensors | wire reduction, operational enhancements | 0.5 | 250 | ground, takeoff, cruise, landing | Existing |

| | | | | | |
|----------------------------|---|-----|-------|----------------------------------|----------|
| EMI detection sensors | safety enhancements | 1.0 | 30 | ground | New |
| Emergency lighting control | wire reduction, flexibility enhancement | 0.5 | 130 | ground, takeoff, cruise, landing | Existing |
| General lighting control | wire reduction, flexibility enhancement | 0.5 | 1,000 | ground, takeoff, cruise, landing | Existing |
| Cabin removables inventory | operational improvement | 0.1 | 1,000 | ground | New |
| Cabin control | wire reduction, flexibility enhancement | 0.5 | 500 | ground, takeoff, cruise, landing | Existing |

9.2.2. L0 : faible débit en dehors de l'avion

| Application | Type of Benefit | Net peak data rate per data-link / (kbps) | Node Quantity | Activity period | New or Existing Application |
|--|---|---|---------------|----------------------------------|-----------------------------|
| Ice detection | Operational and safety enhancement | 0.5 | 20 | Ground, takeoff, cruise, landing | Existing + New |
| Landing gear (proximity) sensors | Wire reduction, flexibility enhancement | 0.2 | 30 | Ground, takeoff, cruise, landing | Existing |
| Landing gear sensors, tire pressure, tire and brake temperature and hard landing detection | Wire reduction, flexibility and operational enhancement | 1.0 | 100 | Ground, takeoff, landing | Existing |
| Landing gear sensors, wheel speed for anti skid control and position feedback for steering | Wire reduction, flexibility and operational enhancement | 5.5 | 40 | Ground, takeoff, landing | Existing |

| | | | | | |
|---|---|-----|-----|--|----------------|
| Flight control system sensors, position feedback and control parameters | Wire reduction, flexibility enhancement | 8.0 | 60 | Ground, takeoff, cruise, landing | Existing |
| Additional proximity sensors, aircraft doors | Wiring reduction, flexibility enhancement | 0.2 | 50 | Ground, takeoff, cruise, landing | Existing |
| Engine sensors | Engine performance, wire reduction, flexibility enhancement | 0.8 | 140 | Ground, takeoff, cruise, landing | Existing + New |
| Cargo Compartment Data | wire reduction, operational enhancements | 0.5 | 25 | Ground, takeoff, cruise, landing, taxi | Existing |
| Structural Sensors | wire reduction, flexibility enhancement, safety enhancements | 0.5 | 260 | Ground, takeoff, cruise, landing, taxi | New |
| Temp./Hum. And Corrosion detection | wire reduction, safety enhancements, operational enhancements | 1.0 | 260 | Ground, takeoff, cruise, landing, taxi | Existing + New |

9.2.3. HI : haut débit à l'intérieur

| Application | Type of Benefit | Net peak data rate per data-link (kbps) | Node Quantity | Activity period | New or Existing Application |
|------------------------------|--|--|---------------------------|--|------------------------------------|
| Air data sensors | Wire reduction, maintenance enhancement | 100 | 8 | ground, takeoff, cruise, landing | Existing |
| FADEC aircraft interface | Wire reduction, maintenance enhancement | 12.5 | 10 | ground, takeoff, cruise, landing, Taxi | Existing |
| Engine prognostic sensors | wire reduction, operational enhancements | 4,800 peak 80 average per sensor | 30 | ground, takeoff, cruise, landing, Taxi | New |
| Cockpit and Cabin crew voice | wire reduction, untethered operation, operational enhancements | 64 Raw 16 CVSD 2.4 MELP | 10 | ground, takeoff, cruise, landing, Taxi | Existing + New |
| Cockpit crew fixed imagery | wire reduction, flexibility enhancement safety enhancements | 2,000 File sizes to > 1MByte 2.5s update each | 50 | ground, takeoff, cruise, landing, Taxi | New |
| Cabin crew fixed imagery | wire reduction, flexibility enhancement safety enhancements | 1,000 File sizes to > 1MByte 5 sec update each | 20 (included in above) | ground, cruise, Taxi | New |
| Cockpit crew motion video | safety enhancements | 64 or 256 | 50 (same as above) | ground, takeoff, cruise, landing, Taxi | Existing + New |
| Cabin crew motion video | safety enhancements | 64 or 256 | 20 (same as above) | ground, takeoff, cruise, landing, Taxi | Existing + New |

| | | | | | |
|------------------------------------|---|--|-----------------------|--|-----|
| Cockpit crew digital data (EFO...) | wire reduction, flexibility enhancement | <1,000 (1,250 KB, >10 sec transfer time) | 10 | ground, takeoff, cruise, landing, Taxi | New |
| Cabin crew digital data | wire reduction, flexibility enhancement | <100 (125 KB, >10 sec transfer time) | 5 (included in above) | ground, cruise, Taxi | New |

9.2.4. HO : haut débit en dehors de l'avion

| Application | Type of Benefit | Net peak data rate per data-link / (kbps) | Node Quantity | Activity period | New or Existing Application |
|---|--|---|---------------|---|-----------------------------|
| Avionics communications bus | wire reduction, flexibility enhancement, safety enhancements | 100 | 30 | Ground, takeoff, cruise, landing, taxi | Existing |
| Audio communications system | wire reduction, flexibility enhancement, safety enhancements | 20 | 10 | Ground | Existing |
| Structural Sensors | wire reduction, flexibility enhancement, safety enhancements | 45 | 250 | Ground, takeoff, cruise, landing, taxi | New |
| External imaging sensors (cameras etc.) | wire reduction, flexibility enhancement, safety enhancements | 1000 | 5 | Ground; rotorcraft operations/hover in confined areas | Existing |
| Active vibration control | wire reduction, operational enhancements | 50 | 25 | Helicopter cruise | Existing |

9.3. Annexe 3 : Tableau des applications capteur sélectionnés

9.3.1. Application avion

| Besoin par applications | | | Avion | | |
|-------------------------|--|---------|---|--|--|
| Application | Type d'application | | Voilure, structure aéronaf | Train d'atterrissage ou mécanique en mouvement, ou ensemble arrimés | Instrumentation banc moteur et environnement moteur |
| Opérabilité | interne externe (maintenance, installateurs, chercheurs, clients) | | oui | oui | oui |
| Malléabilité | mobilité et contraintes environnementales | | mobilité relative (exemple train = mouvements mécaniques) et t° entre -70 et +120 (foudre, vibration) | mobilité complète et t° entre -70 et +120 (contraintes ESD fortes) | mobilité relative et t° entre -70 et +120 (contraintes ESD fortes) |
| Sécurité et sureté | criticité, fiabilité, puissance d'émission | | faible criticité, taux de perte toléré 1 pour 1000 à 5000 retransmission possible | Haute --> Information en exploitation perte tolérée: 1 pour 3000, retransmission limitée à 3 | Haute --> Maintenance ou test intégration système (certification) perte tolérée: 1 pour 5000 retransmission impossible |
| Industrialisation | prix, poids taille | | moins de 200€, de 70g, de L et l = 5cm | moins de 200€, de 80g, de L et l = 5cm | moins de 200€, de 100g, de L et l = 5cm |
| Durabilité/ émulation | durée de vie | Maximum | 20 ans | 20 ans | 20 ans |
| | | Moyenne | 2-5 ans | 2-5 ans | 2-5 ans |
| | | Minimum | 6 mois | 6 mois | 6 mois |
| Architecture | condition de propagation, entité communicante, type de communication | | Confiné / obstrué, éventuellement libre (train) portée souhaitée: < 100m | Confiné / obstrué et libre (ouverture soute) portée souhaitée < 20m | Confiné / obstrué ou libre pour banc d'essais portée souhaitée < 10m |
| | Nombre | | >1000 | < 20 | > 100 |
| | Localisation | | Voilure, structure, cabine/habitacle | Soute, voilure | Compartiment moteur ou banc |

9.3.2. Application hélicoptère

| Besoin par applications | | | Hélicoptère |
|--|--|--------------------|--|
| Application | Type d'application | | Instrumentation pales (sondes températures, efforts, Pression) |
| Opérabilité: Capacité à être facilement opéré par les utilisateurs métiers & les exploitants techniques | opérabilité interne | | oui |
| | opérabilité externe | opérabilité client | non |
| Malléabilité | mobilité et contraintes environnementales | | mobilité complète et t° entre -45 et +120 (foudre, vibration) |
| Sécurité et sureté | criticité, fiabilité, puissance d'émission | | criticité opérationnelle, taux de perte toléré 1 pour 1000 retransmission possible |
| Industrialisation | prix, poids taille, message, fréquence, interaction, contrainte énergétique et densité | | moins de 1000€, de 100g, de L et l = 5cm |
| Durabilité/émulation | durée de vie | Maximum | 20 ans |
| | | Moyenne | 2-5 ans |
| | | Minimum | 6 mois |
| Architecture | condition de propagation, entité communicante, type de communication | | milieu très confiné, ou confiné matériaux composite portée souhaitée: 5m |
| | Echéance de remise au destinataire final : | | < 50ms en règle générale |
| | Nombre | | 20 |
| | Localisation | | Pales |

9.3.3. Application lanceur

| Besoin par applications | | | Lanceur | | |
|-------------------------|--|-------------------------|---|--|--|
| Application | Type d'application | | Mesure technologique - Capteurs haut et basse cadence d'acquisition | Mesure opérationnelle - Capteurs haute et basse cadence d'acquisition | Mesure opérationnelle ou fonctionnelle en phases de production |
| Opérabilité: | opérabilité interne maintenance etc.. | | oui | oui | oui |
| | opérabilité externe (client) | | non | non | non |
| Malléabilité | mobilité et contraintes environnementales | | mobilité relative et SG-1-40 (Vibrations, chocs, températures...) et SG-1-35 (CEM) | | |
| | Mobilité relative des nœuds : | | Pas de nœuds mobiles dans le lanceur, sauf lors des phases de séparations d'étages ? | | |
| | Mobilité des nœuds par rapport à l'environnement : | | Pas de nœuds mobiles dans le lanceur, sauf lors des phases de séparations d'étages | | |
| | Vitesse de déplacement par rapport aux autres nœuds | | AD (vitesse relative faible de l'ordre d'1 m/s) | | |
| | Vitesse de déplacement par rapport à l'environnement | | AD (0 à 10 km/s) | | |
| | Contraintes environnementales | température | t= -40° à +85° | | |
| | | pression et autres | SG-1-40 (Vibrations, chocs, températures...) et SG-1-35 (CEM) | | |
| Sécurité et sureté: | niveau de criticité | | Technologique (Faible) | Opérationnelle (élevée) | Opérationnelle (faible) |
| | Fiabilité | Retransmission possible | Tant que la datation, le temps de vieillissement ou les autres mesures ne sont pas affectés, la retransmission est possible | | |
| | | Taux de perte toléré | AD - Pour info le BER global de la télémesure $A5 < 10E-5$ (de la grandeur physique jusqu'au sol) | | |
| | Puissance d'émission maximale autorisée | | AD - pas de contraintes particulière | | |

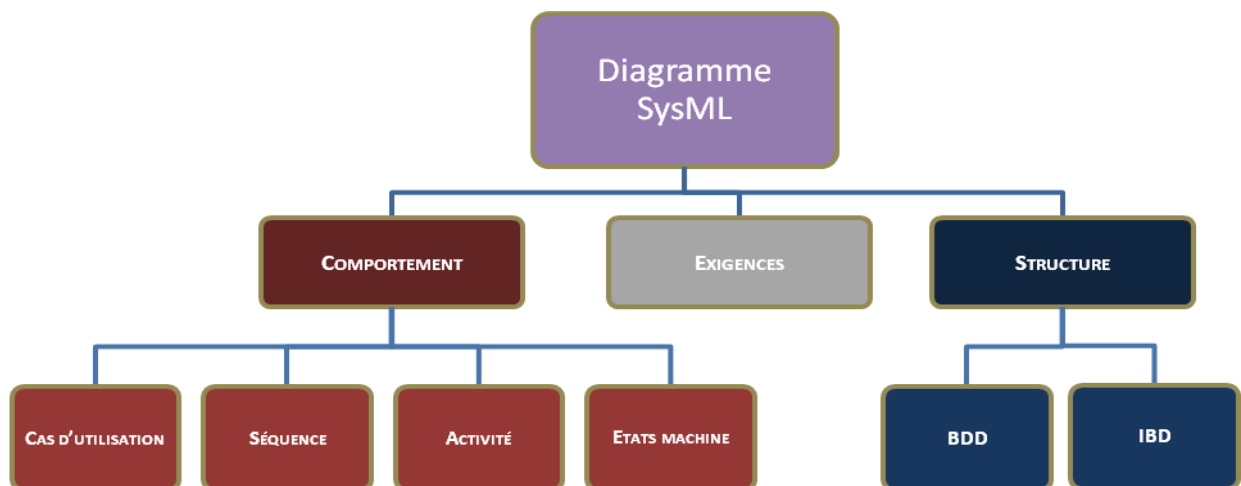
| | | | | | |
|--------------------------|--|---------|---|---------------|---------------|
| Industrialisation | prix, poids taille, message, fréquence, interaction, contrainte énergétique et densité | | moins de 100€, de 80g, de L et l = 5cm | | |
| | Nature de l'information | | Mesures et comptes rendus | | |
| Durabilité/ émulation | durée de vie | Maximum | 4 ans | 4 ans | 4 ans |
| | | Moyenne | 6 mois | 6 mois | 6 mois |
| | | Minimum | chaque mesure | chaque mesure | chaque mesure |
| Architecture | condition de propagation, entité communicante, type de communication | | De manière générale les mesures sans fil s'effectueront à l'intérieur du lanceur au sein d'un étage dans un milieu plus ou moins confiné | | |
| | Nombre | | Petite dizaine jusqu'à une centaine | | |
| | Localisation | | <p>Les localisations peuvent se classer de la manière suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Confinement environnement métallique fort/faible (jupe inter-étage et bâti moteur) - Confinement environnement composite carbone fort/faible (case à équipement) Confinement environnement mixte fort/faible (bâti moteur, coiffe). - Champ libre. | | |

9.4. Annexe 4 : modélisation SysML

Études de cas d'utilisation et analyses de scenario opérationnels : La modélisation SysML permet d'avoir une vision d'ensemble du système et ainsi d'élaborer au mieux une architecture opérationnelle. Le premier diagramme à réaliser est le diagramme d'exigence traduisant tous les besoins recueillis chez les clients/utilisateurs et les contraintes liés à l'environnement du système

Il faudra ensuite définir la structure du système en le décomposant en blocs (diagramme de définition de blocs) et en établissant le lien entre ces blocs on obtiendra alors le diagramme de blocs interne.

Pour finir on déterminera le comportement de notre système par le biais de quatre types de diagramme : le diagramme de cas d'utilisation le diagramme d'activité le diagramme de séquence et le diagramme d'état machine.



9.4.1. Diagramme d'exigence

Rappelons les différents types d'exigence usuellement rencontrés :

Fonctionnalité, opérabilité, disponibilité, performance, sûreté, sécurité, évolutivité, durabilité, transparence.

Le diagramme d'exigence fait apparaître chaque exigence comme un bloc contenant une présentation générale de l'exigence. On peut y renseigner l'auteur et la source pour une meilleure traçabilité. On attribue un code d'identification à chaque exigence qui permet une hiérarchisation de celles-ci et enfin on établit les liens de dépendance entre elles. Plusieurs liens sont possibles.

- Une exigence peut dériver d'une autre
- Une exigence peut être vérifiée par une autre
- Une exigence peut être vérifiée par une autre

9.4.2. Diagramme structure :

9.4.2.1. Définition de bloc

En SysML, les blocs sont un moyen de décrire le système à un certain niveau d'abstraction comme un ensemble de modules. On peut faire le choix de scinder le système en bloc physique ou opérationnel. Il n'y a pas de bonne ou de mauvaise modélisation, tout dépend de l'ingénieur système mais souvent il y a un choix logique qui s'impose selon le système. Chaque bloc a un comportement qui lui est propre. Le diagramme de définition de bloc est principalement utilisé pour figer les propriétés de ces blocs et les relations qu'ils ont entre eux.

9.4.2.2. Bloc interne

Le diagramme de bloc interne est un zoom sur chaque bloc du diagramme de définition. On l'utilise pour spécifier la structure interne de chaque bloc et pour visualiser les connexions entre les parties internes de chaque bloc et les flux échangés entre eux.

On peut raffiner un bloc du diagramme de définition à l'infini. Là encore le niveau d'abstraction sera choisi par l'ingénieur mais selon le système abordé, certains choix relevant du bon sens s'imposent.

9.4.3. Diagramme de comportement :

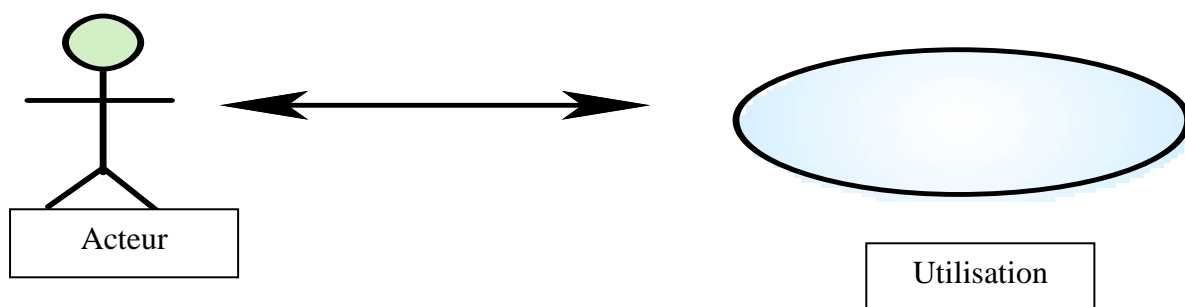
9.4.3.1. Cas d'utilisation

Le but de ce diagramme est de définir tous les scénarios possibles pour les utilisateurs qu'on a déjà répertoriés au préalable (lorsqu'on a étudié l'environnement du système).

On appelle utilisateur tout acteur (homme ou machine) qui manipule le système. L'utilisateur peut être le client, l'équipe de maintenance ou un autre système asservissant le système cible.

On regardera en premier lieu les actions directes que peuvent exercer les utilisateurs puis on analysera les réactions enchainées qui en découlent.

Contrairement aux diagrammes structurels vus plus haut qui servait à définir une architecture globale puis plus précise du système, ce diagramme nous permet de modéliser les comportements du système et ses interactions avec son environnement



9.4.3.2. Diagramme d'activité

L'activité est un aspect clef de la modélisation du comportement en SysML. La modélisation des activités du système zoom sur les entrées, les sorties, les séquences et les conditions de coordination des comportements

Le diagramme d'activité peut aussi indiquer le point spécifique où l'entrée sera requise dans une action et la sortie partielle particulière ainsi produite.

9.4.3.3. Diagramme de séquence

Ce diagramme décrit les interactions entre les différents blocs structurels du système qui ont été préalablement définis dans les diagrammes de structure. Dans certains cas, le diagramme de séquence peut être une alternative au diagramme d'activité dans le sens où il est aussi un moyen de modéliser le comportement du système. La principale différence entre ces deux diagrammes est que le diagramme de séquence se focalise sur les messages transmis entre les blocs alors que le diagramme d'activité pointe plutôt sur le contrôle des flux d'information. Le diagramme de séquence relate implicitement le comportement de la structure, le cycle de vie, l'émetteur, le récepteur des messages. Chaque message représente une requête et évoque un comportement.

9.4.3.4. Diagramme d'état machine

Le diagramme d'état machine est étroitement lié à la modélisation des interactions. Il est basé sur le diagramme de séquence dont les événements et les actions sont reprises. Le diagramme d'état machine doit être un diagramme fils d'un bloc parent. Le diagramme d'état machine étant utilisé pour décrire l'état du bloc dans toutes les instances de son cycle de vie.

9.5. Annexe 5 : Exigences des parties prenantes dérivées

REQ.HN.1 : Exigence aéronaf : le système ne doit pas perturber et ne doit pas être perturbé par l'avionique



- Perte dynamique d'un terminal : il faudra décider de ce qui se passe en cas de perte dynamique de signal due à des perturbations
- Durée du cycle de réinitialisation du système à froid et à chaud : il faudra définir la durée d'un cycle de réinitialisation du système
- Identification dynamique d'un terminal : il faudra gérer les autorisations d'entrer des terminaux dans le réseau
- Paramétrage des modules il faudra paramétrer les débits et les volumes d'information qu'on permettra de faire passer à travers des modules
- Distance de transmission des données entre le capteur et le terminal et le terminal et le concentrateur/routeur : on renseignera les distances de transmission requise pour l'acheminement du message
- Espacement des modules il faudra définir l'espacement minimal et maximal des modules sur l'aéronef.
- Confinement: il faudra renseigner le confinement minimum et maximum au sein des aéronefs envisagés
- Nombre de terminaux par système SAHARA : il faudra définir le nombre de terminaux acceptés sur chaque réseau.
- Nombre de système SAHARA par système hôte : il faudra définir le nombre de réseaux sur chaque aéronef
- Protection de la programmation : il faudra définir le système de protection mis en place pour protéger la programmation (et éviter les attaques pirates)
- Discrimination des réseaux sans fil dans un aéronef ou à proximité de celui-ci : il faudra définir la façon dont le réseau discriminera les réseaux parasites
- Protection des informations échangées : il faudra définir le système de protection mis en place pour protéger les informations échangées (et éviter les attaques pirates)
- Ségrégation des messages des modules : il faudra gérer l'identification de la provenance du message
- Adaptation de la transmission : il faudra définir les différents types de transmission en fonction de la position du système et de son environnement direct
- Résistance aux perturbations RF : il faudra identifier les différents types de perturbation RF auxquels notre système devra résister
- Altération du matériel par le logiciel : il faudra gérer les cas d'altération du matériel par le logiciel
- Compatibilité des connexions : il faudra gérer la compatibilité du système et les interfaces avec les capteurs de type 4-20mA, l'alimentation des capteurs, les capteurs de type PT100 ou PT1000, Les Capteurs de thermocouple, les capteurs de type contact

sec, les capteurs de type logique 0/5VDC, les capteurs de type logique 0/10VDC les capteurs de type logique 0/28VDC les capteurs de type IEPE, les capteurs numériques reliés par bus série, l'alimentation du concentrateur et du routeur, l'interface de communication de test

- Volume : on devra définir la masse que le système ne devra pas dépasser
- Masse : on devra définir la masse que le système ne devra pas dépasser
- Perturbation environnemental : on définira quelles sont les perturbations environnementales auxquelles le système devra résister

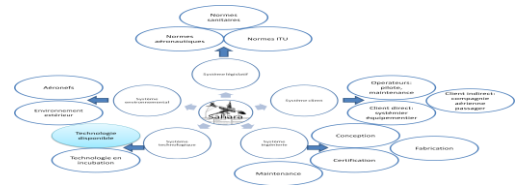
REQ.HN.2 : Exigence environnement : ne pas être perturbé par l'environnement de l'aéronef

- Discrimination des réseaux sans fil dans un aéronef ou à proximité de celui-ci : il faudra définir la façon dont le réseau discriminera les réseaux parasites
- Ségrégation des messages des modules : il faudra gérer l'identification de la provenance du message
- Résistance aux perturbations RF : il faudra identifier les différents types de perturbation RF auxquels notre système devra résister
- Contrainte naturelle extérieure : il faudra définir les exigences de résistance en terme de contrainte de température, humidité, vibration, sable et poussière, accélération, perturbation RF.
- Effet cumulatif de modules dans la même zone : il faudra calculer la contrainte des effets cumulatifs de module



REQ.HN.3 : Exigence technologie disponible : le système devra intégrer un maximum de technologie disponible pouvant être modifiée

- Justification des exigences : il faudra justifier le respect des exigences et les technologies choisies en fonction
- Fréquences RF : il faudra définir la fréquence RF à laquelle on décide d'émettre
- Connectique avec l'environnement : il faudra définir quels type de connectiques on souhaite voir pour l'intégration du système dans l'environnement

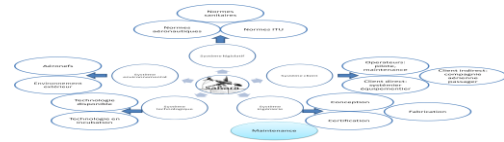


REQ.HN.4 : Exigence technologie en incubation : le système devra justifier le bon fonctionnement global s'il intègre des technologies en incubation

- Justification des exigences : il faudra justifier le respect des exigences et les technologies choisies en fonction
- Solution alternative : il faudra justifier de technologies alternatives pour remplacer les solutions en place
- Fréquences RF : il faudra définir la fréquence RF à laquelle on décide d'émettre



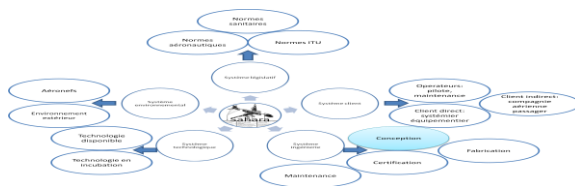
REQ.HN.5 : Exigence maintenance : le système devra raccourcir ou au moins ne pas allonger le temps de maintenance ni complexifier celle-ci



- Perte dynamique d'un terminal : il faudra décider de ce qui se passe en cas de perte dynamique de signal due à des perturbations
- Mise en mode « marche »/ « sommeil » du système SAHARA via le concentrateur : il faudra définir les différents modes du système
- Connaissance de l'état du système : il faudra définir à quel point on souhaite connaître l'état du système
- Temps d'opération sur le système : il faudra décider d'un temps d'opération maximum sur le système
- Remplacement d'un module : il faudra prévoir les cas de remplacement d'un module
- Identification des données échangées : il faudra définir la méthode d'identification des données échangées
- Paramètre d'observabilité : il faudra définir les paramètres d'observabilité lié au protocole, au réseau, aux bilans de liaisons et aux états des modules
- Remontée des mesures : il faudra définir quel type de mesure on souhaite voir remonter, à quelle fréquence et par quel moyen.
- Durée de vie des terminaux (autonomie) : il faudra décider de la durée de vie (minimum et maximum des terminaux)
- Logiciel de configuration / maintenance : il faudra définir quel type d logiciel de maintenance on utilisera
- Moyen de debug : il faudra déterminer les moyen de debug
- Identification des défauts : il faudra définir les différents défauts qui seraient susceptibles d'être rencontrés
- Remontée des erreurs ou alertes, détection panne d'alimentation : il faudra définir de quelle façon on souhaite être alertée ou informé d'erreur potentiel
- Présence de tension : il faudra trouver un moyen de détecter la présence de tension

[illegible]

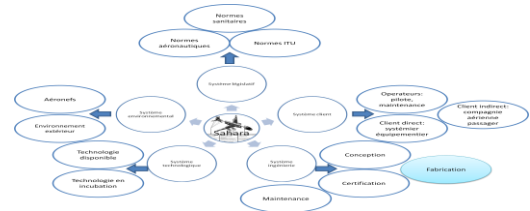
- REQ.HN.7 : Exigence conception : le système devra être conçu avec les moyens de l'équipe de conception**



- Synchronisation de l'horloge de référence des concentrateurs avec le système hôte
- Plan de validation des exigences : il faudra définir un plan de validation des exigences afin de tracer la vérification chacune d'entre elle
- Alimentation avant intégration : Cette exigence fait référence à l'utilisation du terminal avant son intégration sur le lanceur. Celui-ci peut donc être alimenté, manipulé et même testé en laboratoire avant intégration.
- Validation des interfaces : il faudra prévoir l'accord de principe pour les cas d'interface non prévus dans la spécification d'exigence

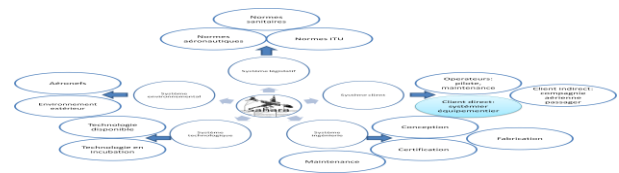
- Interface de communication : il faudra définir les interfaces de communication
- Détail des interfaces : il faudra écrire un document de contrôle d'interface
- Compatibilité matérielle : Il faudra définir les contraintes de compatibilité matérielle
- Pérennité des composants : il faudra définir la longévité minimum de production d'un composant
- Accessibilité des signaux
- Faisabilité du démonstrateur : il faudra définir les jalons du projet pour suivre la faisabilité

REQ.HN.8 : Exigence fabrication : Le système devra être fabriquable pendant une durée de 30 ans, l'intégration du système ne devra pas recourir à des outils spécifique et complexe



- Solution alternative : il faudra justifier de technologies alternatives pour remplacer les
- Compatibilité matérielle : Il faudra définir les contraintes de compatibilité matérielle
- Pérennité des composants : il faudra définir la longévité minimum de production d'un composant
- Vérification des exigences : il faudra définir une matrice de traçabilité pour les fabricants afin de vérifier les écarts avec les exigences originales
- Acheminement des données : il faudra vérifier l'exigence fonctionnelle principale qui consiste à acheminer les données
- Mesure de consommation : il faudra définir le type de mesure de consommation
- Programmation : il faudra choisir le mode de programmation des modules
- Fixation des modules : il faudra définir le mode de fixation des modules
- Identification de la version du logiciel des modules : il faudra identifier la version du logiciel utilisé dans les modules
- Chargement du programme : il faudra définir le mécanisme permettant de charger le programme

REQ.HN.9 : Exigence Client direct : le système devra atteindre les performances exigées par le client



REQ.HN.9.1 : Le système devra faire gagner du temps, de la malléabilité et de l'argent au client direct

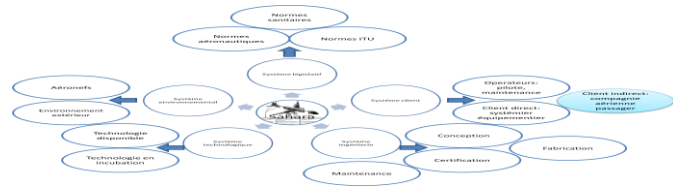
REQ.HN.9.2 : Le système devra être fiable sure et sécurisé

- Interprétation des exigences : il faudra se mettre d'accord sur le langage exprimant les exigences
- Produit compétitif : il faudra exprimer le niveau de compétitivité souhaité
- Vérification des exigences : il faudra définir une matrice de traçabilité pour les fabricants afin de vérifier les écarts avec les exigences originales

- Faisabilité du démonstrateur : il faudra définir les jalons du projet pour suivre la faisabilité
- Mise en mode « marche »/ « sommeil » du système SAHARA via le concentrateur : il faudra définir les différents modes du système
- Liaisons filaires du terminal : il faudra définir à quel endroit on tolère de garder des liaisons filaire
- Paramétrage des modules : il faudra paramétrer les débits et les volumes d'information qu'on permettra de faire passer à travers des modules
- Mesure de consommation : il faudra définir le type de mesure de consommation
- Connaissance de l'état du système : il faudra définir à quel point on souhaite connaître l'état du système
- Temps d'opération sur le système : il faudra décider d'un temps d'opération maximum sur le système
- Programmation : il faudra choisir le mode de programmation des modules
- Déport d'antenne : il faudra expliciter la tolérance quand au déport d'antenne
- Protection de la programmation : il faudra définir le système de protection mis en place pour protéger la programmation (et éviter les attaques pirates)
- Datation des mesures et numéro de format des terminaux : il faudra définir la datation des mesures et les numéros de format des terminaux
- Gestion des événements redoutés : il faudra définir les événements redoutés et mettre en place des scenarios de gestion pour chacun
- Précision des échantillons acquis : il faudra définir la précision souhaité pour les échantillons prélevés
- Protection des informations échangées : il faudra définir le système de protection mis en place pour protéger les informations échangées (et éviter les attaques pirates)
- Durée de vie des terminaux (autonomie) : il faudra décider de la durée de vie (minimum et maximum des terminaux)
- Mémoire mode différé: il faudra définir les deux modes différés pour la mémoire
- Capacité mémoire d'un terminal et d'un concentrateur : il faudra expliciter la capacité mémoire souhaité pour les applications
- Caractérisation de la consommation : il faudra donner les circonstances dans lesquelles on souhaite avoir des caractéristiques de consommation
- Mode de fonctionnement des terminaux : il faudra définir tous les modes de fonctionnement des terminaux
- Compatibilité des connexions : il faudra gérer la compatibilité du système et les interfaces avec les capteurs de type 4-20mA, l'alimentation des capteurs, les capteurs de type PT100 ou PT1000, Les Capteurs de thermocouple, les capteurs de type contact sec, les capteurs de type logique 0/5VDC, les capteurs de type logique 0/10VDC les capteurs de type logique 0/28VDC les capteurs de type IEPE, les capteurs numériques reliés par bus série, l'alimentation du concentrateur et du routeur, l'interface de communication de test
- Volume : on devra définir la masse que le système ne devra pas dépasser
- Masse : on devra définir la masse que le système ne devra pas dépasser

- Outils d'installation : on donnera le type d'outils disponible pour l'installation

**REQ.HN.10 : Exigence client
indirect : le système ne devra pas
déranger le client indirect**



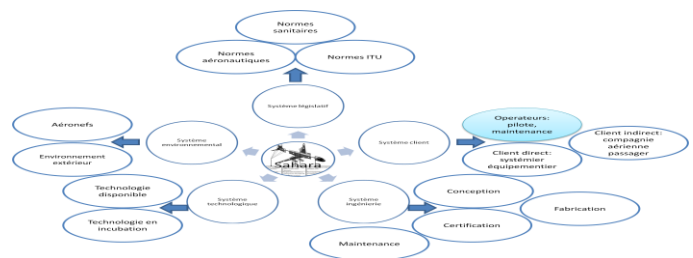
- Protection de la programmation :
il faudra définir le système de protection mis en place pour protéger la programmation (et éviter les attaques pirates)
- Compatibilité Electromagnétique : il faudra définir les profils électromagnétiques

REQ.HN.11 : Exigence opérateur :

REQ.HN.11.1 : Le système devra acheminer des informations vers les opérateurs

REQ.HN.11.2 : Le système devra alarmer l'opérateur si besoin

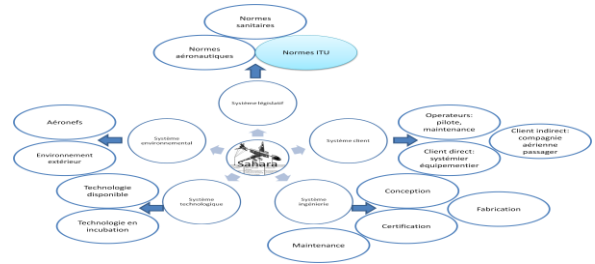
REQ.HN.11.3 : Le système devra répondre aux demandes de l'opérateur



- Durée du cycle de réinitialisation du système à froid et à chaud : il faudra définir la durée d'un cycle de réinitialisation du système
- Mise en sommeil et durée de mise en sommeil des terminaux en phase « transport, stockage »: il faudra définir la durée d'un cycle de mise en sommeil des terminaux
- Mode lors de la phase « transport, stockage » : il faudra définir les modes « écoute » et « mesures différées » lors des phases de« transport, stockage »
- Transfert des informations de configuration en phase de déstockage
- Traitement des mesures déportées : il faudra définir le traitement des mesures déportées
- Remontée des mesures : il faudra définir quel type de mesure on souhaite voir remonter, à quelle fréquence et par quel moyen.
- Liaison bidirectionnelle : il faudra dire dans quelles circonstances on permet une liaison bidirectionnelle
- Fréquence d'acquisition des mesures avions : il faudra déterminer selon les applications quelles seront les fréquences d'acquisition
- Profil de mesure : il faudra prédéfinir les profils de mesures
- Remontée des erreurs ou alertes, détection panne d'alimentation : il faudra définir de quelle façon on souhaite être alertée ou informé d'erreur potentiel
- Présence de tension : il faudra trouver un moyen de détecter la présence de tension

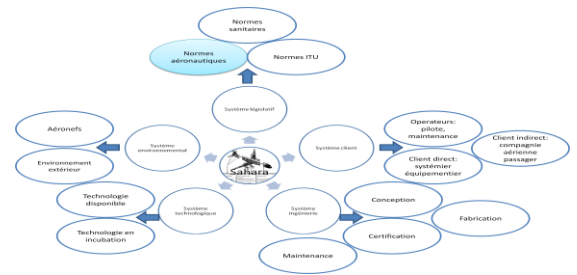
REQ.HN.12 : Exigence normes ITU : le système devra respecter les normes ITU

- Gabarit spectral d'émission : on donnera les différents gabarits d'émission
- Respect des réglementations sur les systèmes RF : on donnera la liste des normes à respecter pour les systèmes RF
- Susceptibilité: on identifiera la susceptibilité rayonnée et induite



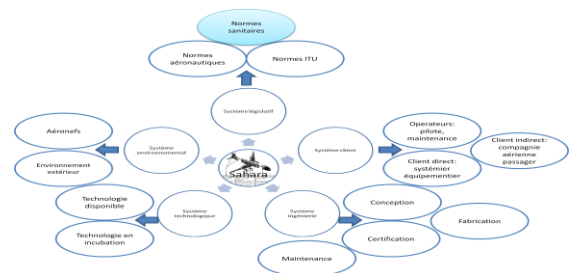
REQ.HN.13 : Exigence normes aéronautique : le système devra respecter les normes aéronautiques

- Durée du cycle de réinitialisation du système à froid et à chaud : il faudra définir la durée d'un cycle de réinitialisation du système
- Datation des mesures et numéro de format des terminaux : on donnera une norme de datation des mesures
- Identification dynamique d'un terminal : il faudra gérer les autorisations d'entrer des terminaux dans le réseau
- Réserve de mémoire : on donnera les réserves mémoires attendues
- Paramétrage des modules il faudra paramétrer les débits et les volumes d'information qu'on permettra de faire passer à travers des modules
- Tolérance aux pannes : il faudra définir la tolérance aux pannes acceptée par les autorités de certification
- Identification et mémorisation des pannes : il faudra définir les cas de pannes à identifier et à mémoriser
- Retransmission de ces séquences en cas de panne : il faudra définir la séquence à retransmettre en cas de panne
- Impact des pannes : il faudra délimiter les impacts d'une panne du système sur l'environnement
- Moyen de debug : il faudra déterminer les moyen de debug
- Identification des défauts : il faudra définir les différents défauts qui seraient susceptibles d'être rencontrés
- Désactivation du système SAHARA : on identifiera les cas d'arrêt total du système



REQ.HN.14 : Exigence normes sanitaires : le système devra respecter les normes sanitaires

- Respect des réglementations sur les systèmes RF : on donnera la liste des normes sanitaire (longueur d'onde à proscrire) à respecter pour les systèmes RF



9.6. Annexe 6 : Tableau de traçabilité

| | | |
|---|---|--|
| EXIGENCES PROJET | REQ.PROJ.1 : Interprétation des exigences | REQ.HN. 9 : Exigence Client direct : |
| | REQ.PROJ.2 : Justification des exigences | REQ.HN. 8 : Exigence fabrication : |
| | | REQ.HN. 3 : Exigence technologie disponible : |
| | | REQ.HN. 4 : Exigence technologie en incubation |
| | REQ.PROJ.3 : Produit compétitif | REQ.HN. 9 : Exigence Client direct |
| | REQ.PROJ.4 : Solution alternative | REQ.HN. 8 : Exigence fabrication |
| | | REQ.HN. 4 : Exigence technologie en incubation |
| | REQ.PROJ.5 : Respect des exigences | REQ.HN. 9 : Exigence Client direct |
| | REQ.PROJ.6: Vérification des exigences | REQ.HN. 9 : Exigence Client direct |
| | | REQ.HN. 8 : Exigence fabrication |
| REQ.PROJ.7 : Plan de validation des exigences | REQ.HN. 7 : Exigence conception | |
| | REQ.HN. 6 : Exigence certification | |
| REQ.PROJ.8: Faisabilité du démonstrateur | REQ.HN. 9 : Exigence Client direct | |
| | REQ.HN. 8 : Exigence fabrication | |

| | | |
|---|--|---|
| EXIGENCES GENERALES | REQ.GE.1 : Perte dynamique d'un terminal | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | | REQ.HN. 5 : Exigence maintenance |
| | REQ.GE.2 : Mise en mode « marche »/ « sommeil » du système SAHARA via le concentrateur | REQ.HN. 9 : Exigence Client direct |
| | | REQ.HN. 5 : Exigence maintenance |
| | REQ.GE.3 : Réinitialisation du système à froid | REQ.HN. 11 : Exigence operateur |
| | REQ.GE.4 : Durée du cycle de réinitialisation du système à froid | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | | REQ.HN. 13 : Exigence normes aéronautique |
| | REQ.GE.5 : Réinitialisation du système à chaud | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | | REQ.HN. 13 : Exigence normes aéronautique |
| | REQ.GE.6 : Identification dynamique d'un terminal | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | | REQ.HN. 13 : Exigence normes aéronautique |
| | REQ.GE.7 : Marge processeur | REQ.HN. 13 : Exigence normes aéronautique |
| | REQ.GE.8 : Acheminement des données | REQ.HN. 11 : Exigence operateur |
| | REQ.GE.9 : Liaisons filaires du terminal | REQ.HN. 9 : Exigence Client direct |
| | REQ.GE.10 : Paramétrage des modules | REQ.HN. 9 : Exigence Client direct |
| | | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| REQ.GE.11 : Mesure de consommation | REQ.HN. 9 : Exigence Client direct | |
| | REQ.HN. 8 : Exigence fabrication | |
| REQ.GE.12 : Connaissance de l'état du système | REQ.HN. 9 : Exigence Client direct | |
| | REQ.HN. 5 : Exigence maintenance | |
| REQ.GE.13 : Temps d'opération sur le système | REQ.HN. 9 : Exigence Client direct | |
| | REQ.HN. 5 : Exigence maintenance | |
| REQ.GE.14 : Programmation | REQ.HN. 9 : Exigence Client direct | |
| | REQ.HN. 8 : Exigence fabrication | |

| | | |
|----------------------------------|---|------------------------------------|
| EXIGENCES ARCHITECTURA LES | REQ.AR.1 : Remplacement d'un module | REQ.HN. 5 : Exigence maintenance |
| | REQ.AR.2 : Fixation des modules | REQ.HN. 8 : Exigence fabrication |
| | REQ.AR.3 : Distance de transmission des données entre le capteur et le terminal | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | REQ.AR.4 : Distance de transmission des données entre le terminal et le concentrateur/routeur | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | REQ.AR.5 : Espacement des modules | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | REQ.AR.6 : Confinement maximum | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | REQ.AR.7 : Confinement minimum | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | REQ.AR.8 : Nombre de terminaux par système SAHARA | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | REQ.AR.9 : Nombre de système SAHARA par système hôte | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | REQ.AR.10 : Nombre terminaux par système hôte | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | REQ.AR.11 : Déport d'antenne | REQ.HN. 9 : Exigence Client direct |

| | | |
|--------------------|---|---------------------------------|
| EXIGENCES MODES | REQ.MOD.1 : Mise en sommeil des terminaux en phase « transport, stockage » | REQ.HN. 11 : Exigence operateur |
| | REQ.MOD.2 : Durée de mise en sommeil des terminaux en phase « transport, stockage » | REQ.HN. 11 : Exigence operateur |
| | REQ.MOD.3 : Mode « écoute » lors de la phase « transport, stockage » | REQ.HN. 11 : Exigence operateur |
| | REQ.MOD.4 : Mode « mesures différées » en phase « transport, stockage » | REQ.HN. 11 : Exigence operateur |

| | | |
|---------------------------------|---|---|
| EXIGENCES COMMUNICAT IONS | REQ.COM.1 : Identification de la version du logiciel des modules | REQ.HN. 8 : Exigence fabrication |
| | REQ.COM.2 : Protection de la programmation | REQ.HN. 9 : Exigence Client direct |
| | | REQ.HN. 10 : Exigence client indirect |
| | REQ.COM.3 : Transfert des informations de configuration en phase de déstockage | REQ.HN. 11 : Exigence operateur |
| | REQ.COM.4 : Chargement du programme | REQ.HN. 8 : Exigence fabrication |
| | REQ.COM.5 : Synchronisation de l'horloge de référence des concentrateurs avec le système hôte | REQ.HN. 7 : Exigence conception |
| | REQ.COM.6 : Datation des mesures et numéro de format des terminaux | REQ.HN. 9 : Exigence Client direct |
| | | REQ.HN. 13 : Exigence normes aéronautique |
| | REQ.COM.7 : Traitement des mesures déporté | REQ.HN. 11 : Exigence operateur |
| | REQ.COM.8 : Identification des données échangées | REQ.HN. 5 : Exigence maintenance |

| | | |
|----------------------------|---|------------------------------------|
| | REQ.COM.9 : Le système transmettra ses paramètres d'observabilité du protocole, du réseau, des bilans de liaisons et des états des modules. | REQ.HN. 5 : Exigence maintenance |
| | REQ.COM.10 : Remontée des mesures | REQ.HN. 5 : Exigence maintenance |
| | | REQ.HN. 11 : Exigence operateur |
| | REQ.COM.11 : Gestion des événements redoutés | REQ.HN. 9 : Exigence Client direct |
| | REQ.COM.12 : Liaison bidirectionnelle | REQ.HN. 11 : Exigence operateur |
| | REQ.COM.13 : Discrimination des réseaux sans fil dans un aéronef ou à proximité de celui-ci | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | | REQ.HN. 2 : Exigence environnement |
| | REQ.COM.14 : Précision des échantillons acquis | REQ.HN. 9 : Exigence Client direct |
| | REQ.COM.15 : Protection des informations échangées | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | | REQ.HN. 9 : Exigence Client direct |
| | REQ.COM.16 : Taux d'erreur lanceur | REQ.HN. 6 : Exigence certification |
| | REQ.COM.17 : Vieillessement des données non prioritaires lanceur | REQ.HN. 6 : Exigence certification |
| | REQ.COM.18 : Vieillessement des données prioritaires lanceur | REQ.HN. 6 : Exigence certification |
| | REQ.COM.19 : Fréquence d'acquisition des mesures avions | REQ.HN. 11 : Exigence operateur |
| | REQ.COM.20 : Ségrégation des messages des modules | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | | REQ.HN. 2 : Exigence environnement |
| EXIGENCES RADIO-FREQUENCES | REQ.COM.21 : Profil de mesure | REQ.HN. 11 : Exigence operateur |
| | REQ.COM.22 : Adaptation de la transmission | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | REQ.COM.23 : Durée de vie des terminaux (autonomie) | REQ.HN. 9 : Exigence Client direct |
| | | REQ.HN. 5 : Exigence maintenance |
| | REQ.COM.24 : Transmission d'information et cycle de vie lanceur | |
| | | REQ.HN. 11 : Exigence operateur |

| | | |
|----------------------------|--|---|
| EXIGENCES RADIO-FREQUENCES | REQ.RF.1 : Fréquences RF | REQ.HN. 3 : Exigence technologie disponible |
| | | REQ.HN. 4 : Exigence technologie en incubation |
| | REQ.RF.2 : Résistance aux perturbations RF | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | | REQ.HN. 2 : Exigence environnement |
| | REQ.RF.3 : Gabarit spectral d'émission | REQ.HN. 12 : Exigence normes ITU |
| | REQ.RF.4 : Respect des réglementations sur les systèmes RF | REQ.HN. 12 : Exigence normes ITU REQ.HN. 14 : Exigence normes sanitaires |

| | | |
|-----------------------|--|---|
| EXIGENCES MEMOIRES | REQ.MEM.1 : Réserve de mémoire | REQ.HN. 13 : Exigence normes aéronautique |
| | REQ.MEM.2 : Réserve pour code téléchargeable | REQ.HN. 6 : Exigence certification |
| | REQ.MEM.3 : Sauvegarde paramètres systèmes | REQ.HN. 13 : Exigence normes aéronautique |
| | REQ.MEM.4 : Mémoire mode différé 1 pour Hélicoptère | REQ.HN. 9 : Exigence Client direct |
| | REQ.MEM.5 : Mémoire mode différé 2 pour Hélicoptère | REQ.HN. 9 : Exigence Client direct |
| | REQ.MEM.6 : Capacité mémoire d'un terminal pour application hélicoptère | REQ.HN. 9 : Exigence Client direct |
| | REQ.MEM.7 : Capacité mémoire d'un concentrateur pour application hélicoptère | REQ.HN. 9 : Exigence Client direct |

| | | |
|---|---|---|
| EXIGENCES CONCERNANT LES CAS DE PANNES | REQ.PAN.1 : Altération du matériel par le logiciel | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | REQ.PAN.2 : Cas des redondances | REQ.HN. 6 : Exigence certification |
| | REQ.PAN.3 : Logiciel de configuration / maintenance | REQ.HN. 5 : Exigence maintenance |
| | REQ.PAN.4 : Tolérance aux pannes | REQ.HN. 6 : Exigence certification |
| | | REQ.HN. 13 : Exigence normes aéronautique |
| | REQ.PAN.5 : Identification et mémorisation des pannes | REQ.HN. 6 : Exigence certification |
| | | REQ.HN. 13 : Exigence normes aéronautique |
| | REQ.PAN.6 : Retransmission de ces séquences en cas de panne | REQ.HN. 6 : Exigence certification |
| | | REQ.HN. 13 : Exigence normes aéronautique |
| | REQ.PAN.7 : Non propagation des pannes | REQ.HN. 6 : Exigence certification |
| | | REQ.HN. 13 : Exigence normes aéronautique |
| | REQ.PAN.8 : Moyen de debug | REQ.HN. 5 : Exigence maintenance |
| | | REQ.HN. 6 : Exigence certification |
| | | REQ.HN. 13 : Exigence normes aéronautique |
| | REQ.PAN.9 : Identification des défauts | REQ.HN. 5 : Exigence maintenance |
| | | REQ.HN. 6 : Exigence certification |
| | REQ.PAN.10 : Remontée des erreurs ou alertes | REQ.HN. 13 : Exigence normes aéronautique |
| | | REQ.HN. 5 : Exigence maintenance |
| | REQ.PAN.12 : Détection panne d'alimentation | REQ.HN. 11 : Exigence operateur |
| | | REQ.HN. 5 : Exigence maintenance |

| | | |
|----------------------|--|---|
| EXIGENCES ENERGIE | REQ.ENE.1 : Présence de tension | REQ.HN. 5 : Exigence maintenance |
| | REQ.ENE.2 : Alimentation avant intégration | REQ.HN. 7 : Exigence conception |
| | REQ.ENE.3 : Caractérisation de la consommation | REQ.HN. 9 : Exigence Client direct |
| | REQ.ENE.4 : Mode de fonctionnement des terminaux | REQ.HN. 9 : Exigence Client direct REQ.HN. 11 : Exigence operateur |

| | | |
|------------------------|---|---|
| EXIGENCES INTERFACE | REQ.INT.GE.1 : Désactivation du système SAHARA | REQ.HN. 13 : Exigence normes aéronautique |
| | REQ.INT.GE.2 : Connectique avec l'environnement | REQ.HN. 3 : Exigence technologie disponible |
| | REQ.INT.GE.3 : Validation des interfaces | REQ.HN. 7 : Exigence conception |
| | REQ.INT.GE.4 : Interface de communication | REQ.HN. 7 : Exigence conception |
| | REQ.INT.GE.5 : Compatibilité des connexions | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | | REQ.HN. 9 : Exigence Client direct |
| | REQ.INT.GE.6 : Détail des interfaces | REQ.HN. 7 : Exigence conception |
| | REQ.INT.A.1 : Compatibilité avec les capteurs | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | REQ.INT.A.2 : Interface capteur de type 0-5VDC : | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | REQ.INT.A.3 : Interface capteur de type 0-10VDC : | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | REQ.INT.A.4 : Interface capteur de type ± 5 VDC : | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | REQ.INT.A.5 : Interface capteur de type ± 10 VDC : | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | REQ.INT.A.6 : Interface capteur de type 4-20mA : | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | REQ.INT.A.7 : Alimentation des capteurs : | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | REQ.INT.A.8 : Capteur de type PT100 ou PT1000 : | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | REQ.INT.A.9 : Capteur de thermocouple : | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | REQ.INT.A.10 : Interface capteur de type contact sec : | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | REQ.INT.A.11 : Interface capteur de type logique 0/5VDC : | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | REQ.INT.A.12 : Interface capteur de type logique 0/10VDC : | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | REQ.INT.A.13 : Interface capteur de type logique 0/28VDC : | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | REQ.INT.A.14 : Capteur de type IEPE : | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | REQ.INT.A.15 : Capteur numérique relié par bus série : | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | REQ.INT.B.1 : Alimentation du concentrateur et du routeur : | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | REQ.INT.C.1 : Interface de communication de test | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | | REQ.HN. 6 : Exigence certification |
| | REQ.INT.C.2 : Interfaces de mise au point | REQ.HN. 6 : Exigence certification |

| | | |
|-------------------------|--------------------|------------------------------------|
| EXIGENCES DIMENSIONS | REQ.DIM.1 : Volume | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | | REQ.HN. 9 : Exigence Client direct |

| | | |
|--|-------------------|------------------------------------|
| | REQ.DIM.2 : Masse | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | | REQ.HN. 9 : Exigence Client direct |

| | | |
|--------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| EXIGENCES MATERIELLES | REQ.MAT.1 : RoHS | REQ.HN. 7 : Exigence conception |
| | REQ.MAT.2 : JTAG | REQ.HN. 7 : Exigence conception |
| | | REQ.HN. 8 : Exigence fabrication |
| | REQ.MAT.3 : Pérennité des composants | REQ.HN. 7 : Exigence conception |
| | | REQ.HN. 8 : Exigence fabrication |
| | REQ.MAT.4 : Accessibilité des signaux | REQ.HN. 7 : Exigence conception |

| | | |
|---|---|---|
| EXIGENCES DE TENUE EN ENVIRONNEMENT | REQ.ENV.1 : Susceptibilité rayonnée | REQ.HN. 12 : Exigence normes ITU |
| | REQ.ENV.2: Susceptibilité en induit | REQ.HN. 12 : Exigence normes ITU |
| | REQ.ENV.3 : Perturbation environnemental | REQ.HN. 1 : Exigence aéronef |
| | REQ.ENV.4 : Outils d'installation | REQ.HN. 9 : Exigence Client direct |
| | REQ.ENV.5 : Contrainte de température | REQ.HN. 2 : Exigence environnement |
| | REQ.ENV.6 : Humidité | REQ.HN. 2 : Exigence environnement |
| | REQ.ENV.7 : Vibration | REQ.HN. 2 : Exigence environnement |
| | REQ.ENV.8 : Sable et poussière | REQ.HN. 2 : Exigence environnement |
| | REQ.ENV.9 : Accélération | REQ.HN. 2 : Exigence environnement |
| | REQ.ENV.10 : Perturbation RF. | REQ.HN. 2 : Exigence environnement |
| | REQ.ENV.11 : Compatibilité Electromagnétique | REQ.HN. 14 : Exigence normes sanitaires |
| | REQ.ENV.12 : Effet cumulatif de modules dans la même zone | REQ.HN. 2 : Exigence environnement |

9.7. Annexe 7: exigences par thématique

9.7.1. Exigences projet

Dans un premier temps penchons nous sur les exigences générales qui peuvent s'appliquer à tous types de projet.

REQ.PROJ.1 : Interprétation des exigences : afin d'éviter tout malentendu ou interprétation faussée de cette spécification d'exigence, les concepteurs s'engagent à consulter les utilisateurs finaux en cas de doutes.

REQ.PROJ.2 : Justification des exigences : En réponse aux exigences émises par les utilisateurs finaux, les solutions, les choix techniques et technologiques, retenus par les responsables en charge de l'étude des démonstrateurs devront au minimum être détaillés dans un dossier contenant le plan de développement et un dossier de justification des choix techniques et technologiques permettant d'assurer le respect des exigences.

REQ.PROJ.3 : Produit compétitif : Il est essentiel, afin d'avoir un prix final compétitif, que les réponses soumises par les concepteurs fassent mention des exigences techniques qui influencent le plus le cout total, qu'il s'agisse de matières premières, de développement du produit, ou de production de masse.

REQ.PROJ.4 : Solution alternative : Lorsque les concepteurs proposent une solution alternative pour satisfaire certaines des exigences, elles devront fournir aussi les preuves démontrant le bien fondé de ces changements.

REQ.PROJ.5 : Respect des exigences : Les concepteurs devront apporter la preuve que les exigences ont toutes bien été respectées, ou fournir un état précis de la couverture partielle d'une exigence et l'impact fonctionnel associé.

REQ.PROJ.6 : Vérification des exigences : Les concepteurs devront établir une matrice de traçabilité et de couverture des exigences énoncées dans le présent document. Les écarts et dérogations devront être soumis à l'approbation des utilisateurs finaux. De même, l'impact de non respect d'une exigence sur d'autres exigences devra être clairement identifié.

REQ.PROJ.7 : Plan de validation des exigences : Les tests nécessaires à la vérification de la conception du démonstrateur doivent assurer la validation de l'ensemble des exigences. Un document devra être rédigé afin de détailler comment chaque exigence sera vérifiée : tests, simulation analyses, revues formelles, expériences, analogie...

REQ.PROJ.8 : Faisabilité du démonstrateur : Si une exigence n'est pas réalisable dans le temps et le budget défini par le projet, après accord des utilisateurs finaux, les concepteurs doivent être à même de garantir l'industrialisation d'un produit répondant aux exigences, exemple : l'emploi de composant grand public pour le démonstrateur avec un équivalent compatible de l'environnement final pour la solution industrielle. Ce critère est applicable aux composants matériels et logiciels des produits développés.

9.7.2. Exigences fonctionnelles et organiques

9.7.2.1. Générales

REQ.GE.1 : Perte dynamique d'un terminal : Si durant la phase d'exploitation un terminal vient à ne plus répondre, ce dernier pourra être réintégré au système suivant la procédure d'identification dynamique d'un terminal. La mise en œuvre de cette fonctionnalité est conditionnée par une analyse système aéronef (sécurité, sûreté, ...).

REQ.GE.2 : Mise en mode « marche »/ « sommeil » du système SAHARA via le concentrateur. Un moyen de mise en mode marche et mode sommeil du système SAHARA sera accessible via le concentrateur. Ce moyen (bouton, interface discrète...) sera défini en accord avec les utilisateurs finaux.

REQ.GE.3 : Réinitialisation du système à froid : Cette exigence porte sur le concentrateur, unique entité connectée au réseau bord d'alimentation du système hôte. Dès lors que l'alimentation parvient au concentrateur, il doit dérouler sa procédure de test d'intégrité puis attendre une requête spécifique du système hôte pour effectuer le contrôle de présence des terminaux qui lui sont affectés. A l'issue de cette phase de contrôle le concentrateur doit être en capacité de fournir au système hôte un état global (présence, absence des terminaux, ...).

REQ.GE.4 : Durée du cycle de réinitialisation du système à froid : Hors modes de veilles, la durée de contrôle de présence des terminaux par le concentrateur ne devra pas excéder 10s. Au-delà de ce délai, les terminaux non détectés seront considérés comme inopérants.

REQ.GE.5 : Réinitialisation du système à chaud : A la demande et suivant un protocole précis, une requête de réinitialisation peut être ordonnée via le concentrateur. Cette réinitialisation du point de vue fonctionnel doit être de 1s et permettre de vérifier l'intégrité du système.

REQ.GE.6 : Identification dynamique d'un terminal : Si durant la phase de réinitialisation à froid ou à chaud un terminal ne peut être détecté (par exemple faute d'énergie suffisante pour les terminaux avec système à récupération énergétique) mais que ce dernier devient opérationnel après la phase de réinitialisation, le concentrateur doit être apte à réintégrer ce terminal après autorisation ou non du système hôte. La mise en œuvre de cette fonctionnalité est conditionnée par une analyse système aéronef (sécurité, sûreté, ...).

REQ.GE.7 : Marge processeur : L'exécution du programme ne doit jamais nécessiter plus de 70% des ressources de calcul disponible. Et ceci, même quand les fonctions de diagnostics sont activées.

REQ.GE.8 : Acheminement des données : Le système doit acheminer des données du capteur au point de traitement.

REQ.GE.9 : Liaisons filaires du terminal : En opération, le terminal doit être indépendant (ne doit pas comporter de câblages externes à part éventuellement ceux dus à l'implémentation du couple terminal / capteur).

REQ.GE.10 : Paramétrage des modules : Il sera possible de transférer des paramètres de configuration de et vers les modules. Le débit et les volumes de données à transférer seront définis en accord avec les utilisateurs finaux. Une règle de mise en œuvre de ces transferts doit être définie afin de garantir un état stable et opérationnel du système.

REQ.GE.11 : Mesure de consommation : Dans le cas où même ces derniers aspects énergétiques sont évacués du périmètre de SAHARA, un temps cumulé de fonctionnement et la valeur de l'énergie utilisée (cumulée) seront périodiquement transmis avec les données « utiles ». Par ailleurs, il sera possible de mesurer la consommation individuelle des sous-fonctions des modules.

REQ.GE.12 : Connaissance de l'état du système : Le système doit permettre à l'équipe de maintenance de connaître son état fonctionnel quelque soit la phase du cycle de vie.

REQ.GE.13 : Temps d'opération sur le système : Le système doit pouvoir être entretenu en un temps inférieur ou égale au temps d'entretien du système filaire qu'il remplace. A défaut le temps de réparation d'un système doit être compatible du cycle de réparation du système hôte.

REQ.GE.14 : Programmation : Les modules pourront être programmés soit : via une prise spécifique dédiée à cet effet, par le réseau bord ou par la liaison RF. Le choix du lien de programmation et restrictions associés dépendent du domaine d'application final.

9.7.2.2. *Architecture physique*

REQ.AR.1 : Remplacement d'un module : Chaque module devra être composé d'un seul bloc afin qu'il soit remplaçable en quelques minutes. L'ajustement ou la calibration d'un module capteur après son installation ou son remplacement doit-être évité.

REQ.AR.2 : Fixation des modules : Un terminal doit présenter une interface de fixation ne nécessitant pas de vis/écrou/perçage. De la colle ou du velcro doivent suffire, le but est de simplifier les opérations et les risques de perte d'objets dans des zones peu accessibles. Ce moyen de fixation est à mettre en regard avec la masse du module et les ambiances mécaniques.

REQ.AR.3 : Distance de transmission des données entre le capteur et le terminal : La distance de transmission des données entre le capteur et le terminal est inférieure à 2 m. Le capteur numérique, source des données à transmettre, peut être distant du module de communication pour des raisons d'accessibilité ou d'ambiances sévères.

REQ.AR.4 : Distance de transmission des données entre le terminal et le concentrateur/routeur : La distance de transmission des données entre le terminal et le concentrateur/routeur est inférieure à 3 m.

REQ.AR.5 : Espacement des modules : Les modules peuvent être espacés de quelques centimètres jusqu'à 50 m. Quelques centimètres dans le cas d'un système de contrôle de santé de l'aéronef et jusqu'à 50m pour un terminal placé à l'extrémité de l'aile avec le concentrateur dans le corps du fuselage.

REQ.AR.6 : Confinement maximum : Le système permet des communications RF dans des volumes de confinement proche de la longueur d'onde des fréquences de communication.

REQ.AR.7 : Confinement minimum : Le système permet des communications RF dans des volumes ouverts avec de nombreux masques.

REQ.AR.8 : Nombre de terminaux par système SAHARA : Le système SAHARA sera capable de fonctionner avec au moins 40 terminaux par voisinage topologique (au sens radioélectrique).

REQ.AR.9 : Nombre de système SAHARA par système hôte : Le système hôte peut contenir jusqu'à « n » systèmes SAHARA, n pouvant varier de 1 à 10. Ceci dans le but de garantir les performances de déterminisme et de vieillissement. Ceci devient une exigence de haut niveau si, à cette justification, on ajoute le besoin de protection contre les agressions malveillantes ou les ambiances RF polluées.

REQ.AR.10 : Nombre terminaux par système hôte : Le système hôte doit être capable de contenir jusqu'à 4 000 modules répartis sur plusieurs systèmes SAHARA.

Justification : Dans le cas où les terminaux seraient chargés de la surveillance de la structure de l'avion (contrôle de santé de l'aéronef) les modules devraient être répartis tous les 0,3 à 1m.

REQ.AR.11 : Déport d'antenne : Les modules seront conçus de telle sorte que l'antenne pourra être déportée. L'ajout de cette antenne déportée doit avoir peu d'influence sur la masse et le volume global du produit final. Le choix de l'antenne déportée sur ses aspects poids et volume fera l'objet d'un accord préalable des utilisateurs finaux.

9.7.2.3. Modes

REQ.MOD.1 : Mise en sommeil des terminaux en phase « transport, stockage » : Les terminaux sont mis en mode sommeil sur ordre des concentrateurs du système SAHARA.

REQ.MOD.2 : Durée de mise en sommeil des terminaux en phase « transport, stockage » : Le réveil d'un système SAHARA est programmable pour une durée comprise entre 1 min et 1 heure.

REQ.MOD.3 : Mode « écoute » lors de la phase « transport, stockage » : Pendant la phase de transport les terminaux sont en mode sommeil, les terminaux se mettent périodiquement en mode « écoute », sans autre fonction active, pendant 5 minutes. En mode « écoute », les terminaux peuvent recevoir et exécuter un signal de réveil de la part du concentrateur gérant le réseau ou le sous-réseau considéré.

Nota : Les 5 minutes sont à confirmer suivant le bilan énergétique, et la durée max du processus de réveil d'un réseau.

REQ.MOD.4 : Mode « mesures différées » en phase « transport, stockage » : Pendant la phase de transport les terminaux sont en mode sommeil. Certains capteurs sont utilisés pour la mesure des ambiances rencontrées, mais aucune donnée n'est transmise en temps réel. Les

valeurs mesurées sont stockées au niveau de chaque terminal et retransmises lors de phases ultérieures...

9.7.2.4. *Communication / protocole*

REQ.COM.1 : Identification de la version du logiciel des modules : Pour chaque module, il doit être possible d'accéder à la référence du logiciel.

REQ.COM.2 : Protection de la programmation : (REQ.HN.1) Les règles suivantes de protection lors de la programmation doivent être prises en compte, le logiciel ne doit pas générer par lui-même des actions non-désirés et/ou non planifiées, l'exécution hasardeuse ou inappropriée du logiciel ne doit pas créer de panne matérielle.

REQ.COM.3 : Transfert des informations de configuration en phase de déstockage : Le système SAHARA permet de transférer des informations de configuration de et vers le capteur. Taille des informations : jusqu'à 100 ko.

Justification : les données propres au terminal choisi, en provenance d'une base de données ou, si ces données sont déjà dans le terminal, vers la base de données de mesure.

REQ.COM.4 : Chargement du programme : Le système doit être doté d'un mécanisme permettant le chargement de programme exécutable dans les composants programmables (s'il y en a) directement sur la (les) carte(s) électronique.

REQ.COM.5 : Synchronisation de l'horloge de référence des concentrateurs avec le système hôte : Le concentrateur reçoit périodiquement (par bus lanceur) la valeur de l'horloge de référence et recale toutes les mesures en provenance des terminaux.

Justification : La période de rafraichissement des horloges dépend, entre autre chose, des dérives caractérisées au niveau de chaque terminal ; elle sera fixée lorsque les aspects métrologiques des composants et les aspects temporels des logiciels embarqués seront caractérisés.

REQ.COM.6 : Datation des mesures et numéro de format des terminaux : Les terminaux reçoivent du concentrateur le numéro de format actif et le concentrateur est capable de dater précisément les mesures ; la dispersion de datation entre les terminaux d'un même réseau est inférieure à 1µs.

Justification : précision métrologique des mesures et capacité de les corrélérer. Le format actif définit : le niveau du conditionnement (courant, tension), la cadence d'échantillonnage, le niveau de priorité du capteur pour la phase considérée, la bande des filtres anti repliement, en lien avec la cadence d'échantillonnage, le type de traitement sur la donnée tel que : codage de source, seuillages, transmissions par écarts successifs, etc.

REQ.COM.7 : Traitement des mesures déporté : Le module doit avoir la capacité d'héberger des éléments, logiciel et/ou matériel, lui permettant d'effectuer un traitement des mesures brutes avant transfert :

- Au concentrateur pour le cas d'un terminal

- Au système hôte pour le cas d'un concentrateur

Un module doit permettre de transférer les mesures brutes et les mesures traitées à la demande.

REQ.COM.8 : Identification des données échangées : Il sera nécessaire d'identifier de quel module proviennent les données.

REQ.COM.9 : Le système transmettra ses paramètres d'observabilité du protocole, du réseau, des bilans de liaisons et des états des modules.

Exemples : débit, taux de réémissions, vieillissement moyen et maxi observé pour les données utiles, type de modulation employé (dans le cas de modulations agiles), niveau de puissance utilisé, temps cumulé de fonctionnement de la batterie, estimation de la durée de vie restante, date courante au moment de l'émission, identification du terminal, numéro de réémission en cas d'échec d'un ou de plusieurs essais de transmission...

REQ.COM.10 : Remontée des mesures : Le système doit pouvoir fournir au système hôte sur demande ou périodiquement les mesures effectuées par le module.

REQ.COM.11 : Gestion des événements redoutés : La confiance au système SAHARA est directement liée à la qualité de la communication. Une qualité de communication intègre le fait d'acheminer correctement une donnée mais également le fait de pouvoir détecter que cette donnée n'est pas correctement acheminée. Ainsi, le système SAHARA devra respecter les événements redoutés décrits ci-dessous.

| Fonction | Evènement redouté | Criticité | Probabilité |
|---|---|--|------------------------------------|
| Communication entre un module capteur et le concentrateur | Perte de la transmission ou transmission erronée, détectée. | MIN | 1e-4 (voir mission type ci-dessus) |
| | Perte de la transmission ou transmission erronée, non détectée. | MAJ | 1e-6 (voir mission type ci-dessus) |
| Risques spécifiques | Détachement d'une partie du module capteur | HAZ | 1e-7 |
| | Surchauffe d'un module ou du concentrateur | CAT (possible impact sur le bord d'attaque de la pale) | 1e-9 |

Définition des termes ci-dessus :

- Perte d'une fonction: une opération de réparation est nécessaire pour retrouver l'état opérationnel de la fonction.
- Panne détectée de la fonction : détection de la panne par le contrôle interne effectué en permanence par le système.
- Panne : perte ou mauvais fonctionnement de la fonction.
- Panne non détectée : non détection de la panne par le contrôle interne effectué en permanence par le système. Ce type de situation est le plus redouté car peut entraîner des situations dangereuses.

Nota 1 : afin de respecter les exigences quantitatives ci-dessus, le concepteur pourra proposer tout type de solutions. On peut par exemple imaginer des solutions basées sur :

- *Un plan de contrôle périodique spécifique, comprenant des séquences de communication prédéfinies,*
- *Une architecture comprenant des redondances,*
- *Des temps de vieillissement plus long au profit de la qualité de transmission,*
- *Incorporation d'éléments de sécurité (HW et/ou SW),*
- *Des fonctions PBIT/IBIT/CBIT plus conséquentes,*

Nota 2 : Risques spécifiques identifiés ci-dessus. Compte tenu du fait que les modules seront positionnés en repère tournant, notamment sur les pales, il sera également important de démontrer l'intégrité mécanique de ces modules afin que ceux ci ne se désagrègent pas et ne surchauffent pas.

REQ.COM.12 : Liaison bidirectionnelle :Le système SAHARA doit permettre une communication bidirectionnelle entre un concentrateur et les autres modules.

Justification : chargement de données et de logiciels dans les terminaux ; production de mesures mémorisées (par exemple pendant les phases de transport), production de mesures à la demande (par exemple pendant les phases d'activité lanceur au sol)...

REQ.COM.13 : Discrimination des réseaux sans fil dans un aéronef ou à proximité de celui-ci : Le système SAHARA doit permettre une cohabitation entre les différents réseaux qui l'entourent que se soit des systèmes SAHARA ou d'autres réseaux sans fils (exemple : identification des roues du porteur intégrant le système SAHARA ou cohabitation des réseaux WIFI de confort passager, radar aéroport).

REQ.COM.14 : Précision des échantillons acquis : Les terminaux devront posséder une résolution d'acquisition paramétrable à la demande et hors usine de 8 à 16 bits.

REQ.COM.15 : Protection des informations échangées : Les échanges internes au système SAHARA pourront être cryptés afin d'être immunisés aux éventuelles intrusions ou piratage des informations. La technique de cryptage choisie devra prendre en compte un compromis indispensable entre puissance de calcul/consommation et performance de cryptage

REQ.COM.16 : Taux d'erreur lanceur : Le taux d'erreur de bit admissible dans un système SAHARA est 10^{-6}

REQ.COM.17 : Vieillessement des données non prioritaires lanceur : (REQ.HN.6) Le vieillissement des données non prioritaires (non critiques pour une phase particulière) sera inférieur à 500 ms.

REQ.COM.18 : Vieillessement des données prioritaires lanceur : Le vieillissement des données prioritaires pour une phase donnée sera inférieur à 120 ms.

Justification : instants avant interruption du lien TM (explosion lanceur).

REQ.COM.19 : Fréquence d'acquisition des mesures avions : La fréquence d'acquisition des mesures est comprise entre des mesures ponctuelles (seconde, heure, jour...etc) et 15 ksps.

REQ.COM.20 : Ségrégation des messages des modules : Les modules doivent être capables d'identifier quel module envoie un message et au besoin rejeter les requêtes qui ne les concernent pas.

Justification : Les modules peuvent être très proches les uns des autres et pourtant concerner des applications complètement différentes. Par exemple : une application concerne la prise de pression sur les pneus, il faut que les modules identifient bien le pneu émettant le message (il y a plusieurs pneus sur un train de roue) et les terminaux présents sur les autres pneus n'ont pas besoin de connaître la pression du voisin (seul le concentrateur utilise cette mesure).

De même, les avions sont rangés tête-bêche dans les hangars, un système n'a aucun intérêt de connaître la pression des roues de l'avion voisin.

REQ.COM.21 : Profil de mesure : Un module doit être capable de faire varier sa fréquence d'acquisition des mesures en fonction de sa phase de fonctionnement (phase du vol).

Justification : Les modules ont des fréquences de mesures et de remonté de ces données qui varient en fonction de la phase d'utilisation. Par exemple une mesure de pression du pneu doit être très fréquente lorsque le train est en contact avec le sol, mais lorsque celui-ci est rentré dans la soute, cette mesure est beaucoup moins fréquente. Sans avoir à reconfigurer le terminal durant le vol (à la limite, un message pour indiquer que l'avion est en l'air) le terminal doit changer seul sa fréquence d'envoi des messages.

REQ.COM.22 : Adaptation de la transmission : Un module doit être capable d'adapter sa liaison RF en fonction des changements de l'environnement mécanique et/ou radio.

Justification : Un avion est amené à changer de configuration au cours de sa vie. Que ce soit lorsque les pièces ne sont pas encore assemblées (environnement plutôt libre lors du transport des pièces) à l'utilisation en exploitation avec les mouvements des parties mobiles (rentrée, sortie des trains, des volets, etc.)

REQ.COM.23 : Durée de vie des terminaux (autonomie) : Il n'y a pas d'exigence chiffrée sur une durée de vie pour le démonstrateur. L'exigence porte sur la justification du choix des

solutions minimisant la consommation) pour pouvoir faire face dans un deuxième temps à ce verrou technologique.

Justification : Les maintenances complètes des avions ont lieu tous les 4-5ans. Les terminaux autonomes en énergie doivent pouvoir être utilisés le plus longtemps possible et ne doivent pas nécessiter un remplacement des batteries à chaque maintenance. Bien que l'aspect énergétique ne fasse pas partie du projet SAHARA, la conception du système radio doit tenir compte de ces contraintes afin d'optimiser l'utilisation des ressources.

REQ.COM.24 : Transmission d'information et cycle de vie lanceur : Le système devra être capable de transmettre des données à chaque phase de vie comprise entre le déstockage des composants du réseau et la fin de vol du lanceur.

Justification : chargement des données capteurs au déstockage, jusqu'à la fin de la fonction TM du lanceur

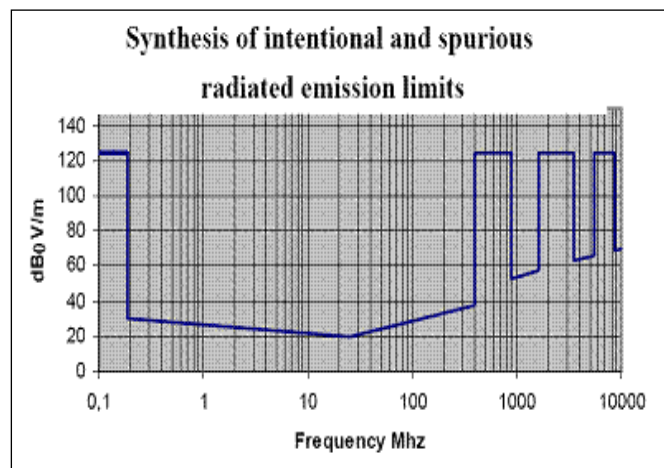
9.7.2.5. Liaison RF

REQ.RF.1 : Fréquences RF : (REQ.HN.4) Le projet SAHARA s'appuyant sur les normes IEEE 802.11 et IEEE 802.15.4, Les fréquences mises en œuvre seront celles recommandées par ces normes. Néanmoins les Laboratoires peuvent proposer d'étudier des bandes de fréquences différentes, pour mieux répondre aux contraintes des aéronefs.

REQ.RF.2 : Résistance aux perturbations RF : (REQ.HN.1) Le produit développé dans le cadre du projet devra être capable de résister à des perturbations RF, notamment celles de la bande ISM. Que ce brouillage soit intentionnel ou qu'il provienne d'un émetteur parasite à proximité.

REQ.RF.3 : Gabarit spectral d'émission : En termes de puissance, les émissions RF doivent respecter les exigences ci-dessous :

| | Frequency |
|--------|---------------------------|
| BAND 1 | < 190 kHz |
| BAND 2 | 470-840 MHz / 860-900 MHz |
| BAND 3 | 1.8 – 3.5 GHz |
| BAND 4 | 5.5 – 8.5 GHz |



Les 4 bandes spécifiques de la courbe identifie les bandes fréquentielles dans lesquelles il n'y a pas de récepteur pour une application civile (on ne considère pas en première approche les cas particuliers des Hélicoptères militaires). Ainsi, dans ces bandes, on peut relaxer la

contrainte d'émission rayonnée imposée dans le tableau ci-dessus en autorisant une puissance maximale de 100mW.

Cette puissance de 100 mW se traduit par un champ de 120dB μ V/m mesuré à un mètre, en prenant comme hypothèse une émission omnidirectionnelle.

REQ.RF.4 : Respect des réglementations sur les systèmes RF : (REQ.HN.14) Les émetteurs doivent répondre aux exigences spécifiques provenant des organismes internationaux (ITU, FCC, ERC) qui réglementent toute émission.

9.7.2.6. Mémoire

REQ.MEM.1 : Réserve de mémoire : La capacité des mémoires internes des modules devra être dimensionnée afin de permettre une réserve d'au minimum 50% de la capacité globale.

Cette exigence s'applique à tout type de mémoire (vive, morte, reprogrammable) composant des systèmes programmables inclus (FPGA, ASIC, ...).

REQ.MEM.2 : Réserve pour code téléchargeable : La capacité des mémoires hébergeant le code exécutable et téléchargeable doit être au minimum de deux fois la taille de l'exécutable (en version finale : TRL5+) plus la réserve de 50%.

REQ.MEM.3 : Sauvegarde paramètres systèmes : Le système doit pouvoir, hors liens usines, recevoir et sauvegarder en mémoire des paramètres systèmes de : calibration, coefficients des lois de conversion, configuration réseau...

Et ceci malgré la perte d'énergie du module.

REQ.MEM.4 : Mémoire mode différé 1 pour Hélicoptère : Le terminal doit avoir la capacité d'effectuer une forte cadence d'échantillonnage (max 30 kech/s) sur une courte période (max 5 secondes), et ceci plusieurs fois par heures (max 5 fois) pendant une durée maximale de vol de 6 heures. Dans une telle configuration, les données pourront être transmises, soit sur ordre du concentrateur, soit de manière automatique, sans aucune exigence de vieillissement (données non exploitées en temps réel). En revanche la durée totale pour transmettre l'ensemble de ces données ne devra pas excéder 2 mn.

REQ.MEM.5 : Mémoire mode différé 2 pour Hélicoptère : Le terminal doit avoir la capacité d'effectuer une faible cadence d'échantillonnage (max 10 ech/s) pendant toute une durée de vol (max 6 heures). Dans une telle configuration, les données pourront être transmises, soit sur ordre du concentrateur, soit de manière automatique, sans aucune exigence de vieillissement (données non exploitées en temps réel). En revanche la durée totale pour transmettre l'ensemble de ces données ne devra pas excéder 15s.

REQ.MEM.6 : Capacité mémoire d'un terminal pour application hélicoptère : La mémoire interne d'un terminal sera compatible avec :

- Une cadence d'acquisition de 15 kech/s
- Un vieillissement max de 50 ms
- Un ensemble de paramètres d'observabilité associé à chaque trame

REQ.MEM.7 : Capacité mémoire d'un concentrateur pour application hélicoptère : La mémoire interne du concentrateur sera compatible avec :

- Un réseau de 20 terminaux.
- Une cadence d'acquisition de 15 kech/s
- Un vieillissement max de 50 ms
- Un ensemble de paramètres d'observabilité associé à chaque trame

9.7.2.7. Gestion des pannes et maintenance

REQ.PAN.1 : Altération du matériel par le logiciel : (REQ.HN.1) Le logiciel ne doit pas altérer la tolérance aux pannes du matériel.

Auto Tests (Built-in Test Equipment): le système SAHARA doit avoir la capacité de s'auto contrôler afin d'identifier les modules, les connexions, les mémoires etc. défectueux ou inversement d'apporter l'information que le système SAHARA est a son fonctionnement nominal. Le résultat de ces contrôles devra être mémorisé pour une exploitation ultérieure.

REQ.PAN.2 : Cas des redondances : L'ensemble des redondances, s'il y en a, devront être testables.

REQ.PAN.3 : Logiciel de configuration / maintenance : Un logiciel permettant la configuration des modules et le diagnostic du système SAHARA devra être fourni. Le logiciel du système SAHARA permettra de lire en temps réel les données provenant des modules. L'IHM sera définie en accord avec les utilisateurs finaux.

De manière générale le logiciel pourra être utilisé au sol mais également en vol lors des phases d'essais du système. On sera alors dans un cadre de validation en vol du système.

REQ.PAN.4 : Tolérance aux pannes : Le système SAHARA doit être tolérant à la panne. En l'occurrence, si l'un des sous-systèmes est en situation de panne détectée, le système doit automatiquement se reconfigurer en considérant ce sous-système défaillant. La durée de reconfiguration sera définie en accord avec les utilisateurs finaux.

REQ.PAN.5 : Identification et mémorisation des pannes : Dans le cas d'une panne détectée de la transmission, le système doit permettre d'identifier et mémoriser les séquences concernées.

Correction aux pannes

REQ.PAN.6 : Retransmission de ces séquences en cas de panne : Pour l'ensemble des séquences identifiées ayant subi des pannes lors de la transmission, le système doit permettre une retransmission de ces séquences. Cette retransmission pourra se faire soit de manière automatique et périodique, soit sur demande.

REQ.PAN.7 : Non propagation des pannes : Une panne d'un module ne doit pas entraîner la panne du système SAHARA, ni d'un autre module.

REQ.PAN.8 : Moyen de debug : Un mécanisme doit être prévu afin de permettre le debug du logiciel implanté sur la(les) carte(s) électronique.

REQ.PAN.9 : Identification des défauts : Il doit être possible d'identifier la cause de tous problème, défaut, erreur ou comportement anormal du logiciel de manière unique.

REQ.PAN.10 : Remontée des erreurs ou alertes : Le système doit pouvoir fournir au système hôte tout message permettant de l'alerter sur son état fonctionnel ou dysfonctionnel. On pourra distinguer plusieurs niveaux de pannes et d'erreurs pour justifier du bon état de fonctionnement du système.

REQ.PAN.11 : Détection panne d'alimentation : Si une panne arrivait à cause de l'alimentation, il faudra que l'identification du problème se fasse facilement. Le système devra donc contrôler en permanence ce paramètre (cadence mini 10 Hz). Le paramètre alimentation sera accessible par l'utilisateur à tout moment, il pourra par exemple être incluse dans le mot de maintenance.

9.7.2.8. *Energie*

Bien qu'on ait choisi de ne pas traiter en profondeur les problématiques d'alimentation, on sait que cette problématique restera un verrou technologique incontournable. C'est la raison pour laquelle dans ce projet on essaiera d'avoir un maximum d'informations sur le sujet pour un prochain projet dédié à cet aspect et d'optimiser au mieux la consommation du système SAHARA.

REQ.ENE.1 : Présence de tension : Un moyen simple doit permettre d'identifier si chaque élément composant SAHARA est sous tension ou non.

REQ.ENE.2 : Alimentation avant intégration : Le terminal peut être alimenté de l'extérieur par une liaison filaire.

Nota : Cette exigence fait référence à l'utilisation du terminal avant son intégration sur le lanceur. Celui-ci peut donc être alimenté, manipulé et même testé en laboratoire avant intégration.

REQ.ENE.3 : Caractérisation de la consommation : Les caractéristiques de consommation devront faire l'objet d'une attention particulière au cours du projet (Consommation max/min, Priorité d'alimentation, consommations des différentes fonctions etc..). Un bilan de consommation par fonctionnalité et mode opérationnel devra être remis par les concepteurs.

REQ.ENE.4 : Mode de fonctionnement des terminaux : Il y a au moins cinq modes de fonctionnement des terminaux :

- Le mode « marche » : L'acquisition des mesures et la transmission sont actives.
- Le mode « mesure différée » : Seule l'acquisition est active avec stockage local dans le terminal.
- Le mode « écoute » : Le terminal est uniquement en attente d'une commande du concentrateur.
- Le mode « sommeil » : Le terminal est en consommation minimale (sleep ou sommeil) pour une durée prédéfinie à l'issue de laquelle il change de mode.
- Le mode « arrêt » : Le terminal est hors-tension.

9.7.2.9. Interfaces du réseau SAHARA

9.7.2.9.1. Générales

REQ.INT.GE.1 : Désactivation du système SAHARA : La désactivation d'un système SAHARA devra être possible en moins de 5 minutes. Un ordre du système hôte doit permettre cette désactivation/réactivation.

REQ.INT.GE.2 : Connectique avec l'environnement : La nature de l'interface physique (connectique) entre les modules et les environnements d'intégration sera du type bornier pour les interfaces capteurs (analogique et/ou numérique) et RJ45 ou SUBD pour la sortie bus. La connectique pour les alimentations externes sera aussi du type bornier.

REQ.INT.GE.3 : Validation des interfaces : Tous les aspects des interfaces qui n'auraient pas été mentionnés dans le présent document devront faire l'objet d'un accord conjoint entre les concepteurs et les utilisateurs finaux.

REQ.INT.GE.4 : Interface de communication : Le choix d'interface de communication du système avec l'environnement final devra être validé par les utilisateurs finaux.

REQ.INT.GE.5 : Compatibilité des connexions : Les concepteurs devront étudier les interfaces matérielles du système afin d'être compatible d'un certain nombre de capteurs existants (ou simulateurs) et de l'interface (bus de communication) avec les moyens d'essais et les plateformes de démonstrations avionique.

REQ.INT.GE.6 : Détail des interfaces : Toutes les caractéristiques de la connectique, des signaux entrant, sortant et performances attendues seront décrites dans un document de contrôle d'interface, tant du point de vue matériel que logiciel.

9.7.2.9.2. Interface de type A : Capteurs et actionneurs

REQ.INT.A.1 : Compatibilité avec les capteurs aéronautiques : Le système devra être suffisamment modulaire afin de s'adapter au plus grand nombre de capteurs actuels et préparer la compatibilité avec la future génération de capteurs (conditionnement de signaux modulaire).

REQ.INT.A.2 : Interface capteur de type 0-5VDC : Le module s'interfacera avec des capteurs à sortie analogique de type tension 0/5VDC.

REQ.INT.A.3 : Interface capteur de type 0-10VDC : Le module s'interfacera avec des capteurs à sortie analogique de type tension 0/10VDC.

REQ.INT.A.4 : Interface capteur de type ± 5 VDC : Le module s'interfacera avec des capteurs à sortie analogique de type tension ± 5 VDC.

REQ.INT.A.5 : Interface capteur de type ± 10 VDC : Le module s'interfacera avec des capteurs à sortie analogique de type tension ± 10 VDC.

REQ.INT.A.6 : Interface capteur de type 4-20mA : Le module s'interfacera avec des capteurs à sortie analogique de type 4-20mA.

REQ.INT.A.7 : Alimentation des capteurs : Le module devra permettre l'alimentation des capteurs de type pont en 5V ou 10V.

REQ.INT.A.8 : Capteur de type PT100 ou PT1000 : Le module s'interfacera avec des capteurs de type thermistances PT100 ou PT1000.

REQ.INT.A.9 : Capteur de thermocouple : Le module s'interfacera avec un capteur de type thermocouple.

REQ.INT.A.10 : Interface capteur de type contact sec : Le module s'interfacera avec des capteurs à sortie de type tout ou rien : contact sec libre de tout potentiel.

REQ.INT.A.11 : Interface capteur de type logique 0/5VDC : Le module s'interfacera avec des capteurs à sortie de type tout ou rien : 0/5VDC.

REQ.INT.A.12 : Interface capteur de type logique 0/10VDC : Le module s'interfacera avec des capteurs à sortie de type tout ou rien : 0/10VDC.

REQ.INT.A.13 : Interface capteur de type logique 0/28VDC : Le module s'interfacera avec des capteurs à sortie de type tout ou rien : 0/28VDC.

REQ.INT.A.14 : Capteur de type IEPE : Le module s'interfacera avec des capteurs de type IEPE.

REQ.INT.A.15 : Capteur numérique relié par bus série : Le module s'interfacera avec des bus standards de type I²C, SPI et série asynchrone

9.7.2.9.3. Interface de type B : Réseau de bord

REQ.INT.B.1 : Alimentation du concentrateur et du routeur : L'alimentation du concentrateur et éventuellement du routeur, dans le cas où il serait connecté réseau bord, devra supporter les perturbations du réseau 28VDC présentes sur aéronef.

9.7.2.9.4. Interfaces de type C : Moyens d'essai

REQ.INT.C.1 : Interface de communication de test : L'interface de communication entre le concentrateur et le reste de l'avionique ou les moyens de tests SAHARA par une liaison du type Ethernet et/ou RS422/232. Cette interface n'étant pas le cœur du projet mais est essentielle à la bonne « testabilité » de l'ensemble du système SAHARA (réseau de modules et de concentrateurs). Toutes les caractéristiques des signaux, des protocoles de communication et des interfaces logicielles seront décrites dans un document de contrôle d'interface.

REQ.INT.C.2 : Interfaces de mise au point : Pour le démonstrateur, il faut ajouter une interface permettant de solliciter le système et de recueillir des informations sur son état de fonctionnement : mise au point, retour des données, etc.

9.7.2.10. Dimensions terminaux, routeurs et concentrateurs

REQ.DIM.1 : Volume : La fonctionnalité SAHARA intégrée aux terminaux aura un volume inférieur à 10 cm^3 afin de disposer d'une solution plus concurrentielle que celles disponibles à la fin du projet.

REQ.DIM.2 : Masse : La fonctionnalité SAHARA intégrée aux terminaux devra être d'une masse inférieure à 20 g afin de disposer d'une solution plus concurrentielle que celles disponibles à la fin du projet.

9.7.2.11. Matériel

REQ.MAT.1 : RoHS : Les procédés utilisés pour la conception de la carte doivent permettre une fabrication mixte ou compatible ROHS.

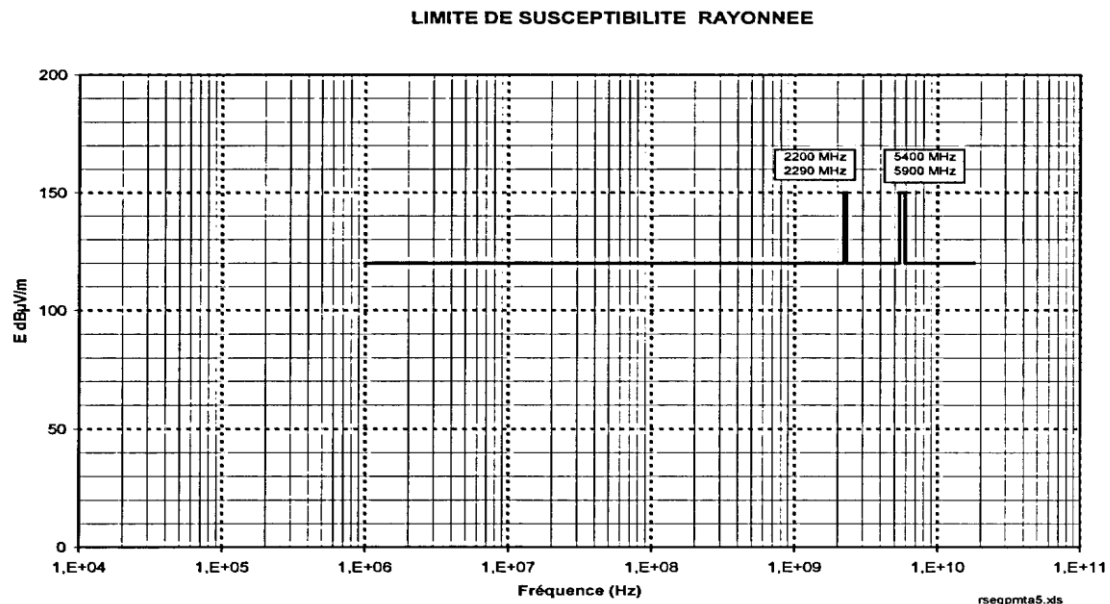
REQ.MAT.2 : JTAG : L'utilisation de composants ayant des fonctionnalités JTAG doit être privilégiée.

REQ.MAT.3 : Pérennité des composants : L'utilisation de composants en fin de vie ou en voie d'obsolescence est prohibée.

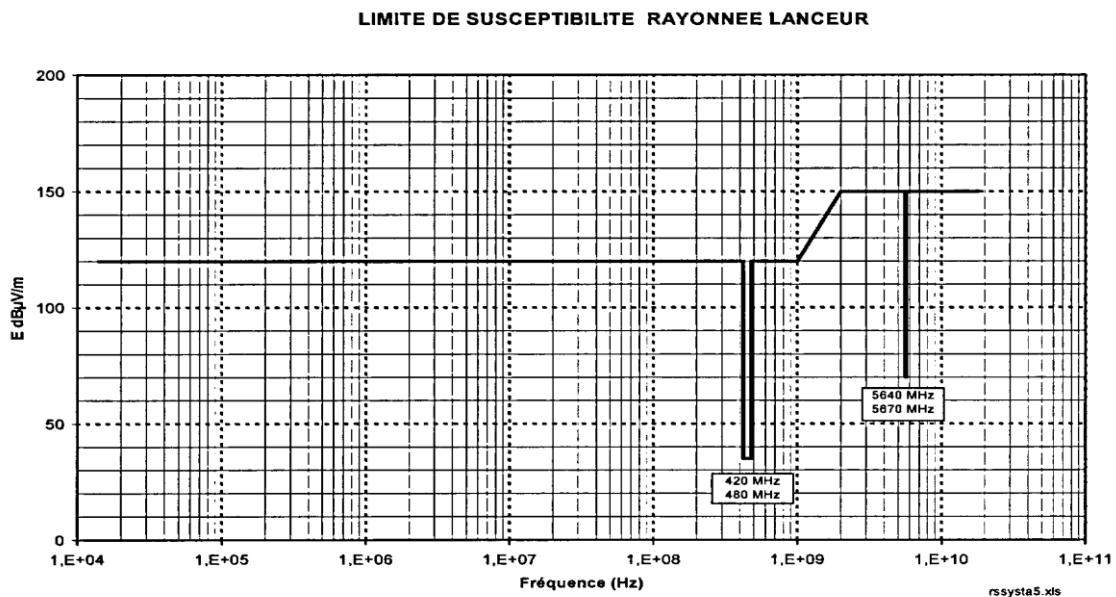
REQ.MAT.4 : Accessibilité des signaux : Toutes les fonctionnalités et signaux importants de(s) carte(s) électronique(s) doivent être accessibles.

9.7.2.12. Plateformes d'essais et environnement des démonstrateurs.

REQ.ENV.1 : Susceptibilité rayonnée :



REQ.ENV.2: Susceptibilité en induit



REQ.ENV.3 : Perturbation environnemental : L'installation du système SAHARA ne devra pas affecter le fonctionnement des systèmes environnants.

Le système SAHARA n'est peut-être pas critique mais son environnement peut l'être

REQ.ENV.4 : Outils d'installation : Aucuns outils spéciaux ne devront être requis pour installer ou désinstaller le système SAHARA.

Justification : un outil spécial est un outil qui n'est pas identifié dans la LRU

REQ.ENV.5 : Contrainte de température : Le système SAHARA doit résister à des températures allant de -55°C à +85°C.

Justification : les capteurs doivent pouvoir se trouver à l'extérieur comme à l'intérieur de l'avion mais aussi près des moteurs.

REQ.ENV.6 : Humidité : Le système SAHARA devra résister à l'humidité de l'environnement dans lesquels il sera déployé.

REQ.ENV.7 : Vibration : Si la vibration perturbe la liaison RF, le système SAHARA devra être testé.

REQ.ENV.8 : Sable et poussière : Le système SAHARA devra résister à l'environnement sable et poussières dans lequel il sera déployé.

REQ.ENV.9 : Accélération : Le système SAHARA devra résister à une accélération de 9g.

REQ.ENV.10 : Perturbation RF : La communication RF du système SAHARA ne doit pas être perturbée par des émissions environnantes dans la bande de fréquences de 10kHz à 20GHz.

REQ.ENV.11 : Compatibilité Electromagnétique : Le système SAHARA doit avoir des niveaux CEM compatible avec la norme CE.

REQ.ENV.12 : Effet cumulatif de modules dans la même zone : Pour prendre en compte l'effet cumulatif dû à un grand nombre d'équipements similaires installés à dans la même zone avion, Il doit être appliqué un facteur de réduction par rapport à la limite d'émission.

Quand il y a plus de 7 équipements identiques installés dans la même zone un facteur de réduction doit être appliqué aux limites définies sur les niveaux d'émission totale. Les facteurs de réduction applicable peuvent être pris dans la table suivante et ce, fonction de la distance minimale entre 2 équipements similaires.

| Number of | Reduction Factor for Min. Dist. < 1m | Reduction Factor for 1m ≤ Min. Dist. ≤ 3m | Reduction Factor for Min. Dist. > 3m |
|------------------|--|--|--|
| 8 – 16 | -11dB | -9 dB | -5dB |
| 17 – 32 | -13dB | -10dB | -5dB |
| 33 – 64 | -15dB | -11dB | -6dB |
| 65 – 128 | -17dB | -12dB | -6dB |
| 129 – 256 | -19dB | -13dB | -7dB |
| 257 – 512 | -21dB | -14dB | -7dB |

9.8. Annexe 8 : étude fréquentielle

| Fréquence en MHZ | 0 - 0,19 | 0,19 - 1,75 | 1,75 - 2 | 2 - 41 | 41- 46 | 46 - 86 | 86 - 108 |
|------------------|----------|-------------|----------|--------|-----------------|---------|----------------------|
| Airbus | oui | non | oui | non | non | non | non |
| Eurocopter | oui | non | non | non | non | non | non |
| autre | | | | | bande I tele | | Radio, tele bande II |

| Fréquence en MHZ | 108- 174 | 174-310 | 310- 400 | 400- 450 | 450-467 | 467- 470 | 470- 496 |
|------------------|--------------------|--------------------------------------|---------------|---------------|-------------------------|---------------|------------|
| Airbus | non | non | non | oui | oui | oui | oui |
| Eurocopter | non | non | non | non | non | non | oui |
| autre | interbande tele | interbande hyperband bande III | hyper band | hyper band | hyperband et gsm 400 | hyper band | gsm 400 |

| Fréquence en MHZ | 496-606 | 606 - 825 | 825 - 840 | 840 - 860 | 860 - 880 | 880 - 900 | 900 - 915 |
|------------------|------------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|---------------|---------------|
| Airbus | oui | oui | moyen | moyen | moyen | moyen | moyen |
| Eurocopter | oui | oui | oui | non | oui | oui | non |
| autre | bande IV tele | bande V tele | | | | gsm 900 2G | gsm 900 2G |

| Fréquence en MHZ | 915 - 925 | 925 - 960 | 960 - 1215 | 1215 - 1530 | 1530 - 1660 | 1660 - 1710 | 1710 - 1785 |
|------------------|-----------|---------------|------------|-------------|-------------|-------------|----------------|
| Airbus | moyen | moyen | non | oui | non | oui | moyen |
| Eurocopter | non | non | non | non | non | non | non |
| autre | | gsm 900 2G | | | | | gsm 1800 2G |

| Fréquence en MHz | 1785 - 1800 | 1800- 1805 | 1805 - 1880 | 1880-1900 | 1900- 1990 | 1990 - 2025 | 2025- 2110 |
|------------------|-------------|------------|-------------|-------------------|------------|-------------|------------|
| Airbus | moyen | moyen | moyen | moyen | moyen | oui | oui |
| Eurocopter | non | oui | oui | oui | oui | oui | oui |
| autre | | | gsm 1800 2G | gsm 1900 2G et 3G | 3G | 3G | |

| Fréquence en MHz | 2110- 2200 | 2200 - 2400 | 2400 - 2483 | 2483- 2500 | 2500- 2690 | 2690 - 2700 | 2700 - 2900 |
|------------------|------------|-------------|----------------|------------|------------|-------------|-------------|
| Airbus | moyen | moyen | moyen | oui | oui | oui | non |
| Eurocopter | oui | oui | oui | oui | oui | oui | oui |
| autre | 3G | | WIFI et ZIGBEE | | 2,5G | | |

| Fréquence en MHz | 2900 - 3500 | 3500 - 4200 | 4200 - 4400 | 4400 - 5030 | 5031 - 5091 | 5091- 5150 | 5150 - 5350 |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|
| Airbus | oui | oui | non | oui | non | moyen | moyen |
| Eurocopter | oui | non | non | non | non | non | non |
| autre | | | | | | | UMTS 5G |

| Fréquence en MHz | 5350- 5470 | 5470 - 5500 | 5500 - 5600 | 5600 - 5650 | 5650 - 5725 | 5725 - 8500 | 8500 - 9333 | 9333 - 9345 |
|------------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Airbus | oui | oui | oui | non | oui | oui | oui | non |
| Eurocopter | non | non | oui | oui | oui | oui | non | non |
| Autre | | UMTS 5G | UMTS 5G | UMTS 5G | UMTS 5G | | | |

9.9. Annexe 9 : étude sécurité

9.9.1. Localisation des points à risques pour la sécurité

Dans cette étude on ne s'intéresse qu'à la sécurité et bien que notre système présente d'autres risques que ce soit au niveau de la fiabilité (conditions environnementales sévères mentionnées plus haut ou tolérance aux fautes) ou de la sûreté de fonctionnement (interférences avec le reste de l'avionique embarqué sur l'aéronef) dues au matériel hardware principalement on n'étudiera que l'aspect sécurité qui consiste à prévoir les scénarii d'intrusion volontaires. Les autres aspects sont analysés en profondeur dans une autre étude.

Un intervenant mal intentionné tentera de brouiller ou d'usurper la communication.

On étudiera donc naturellement le sous-système « communication » composé des modules antennes (réception émission) en profondeur pour ce qui concerne la sécurité.

9.9.1.1. Hard

Pour ce qui est du hard, il est suffisamment inaccessible au public (des études sécurité ont déjà été menée en ce sens) pour avoir à s'en inquiéter. Ceci étant, il est maintenu par le personnel au sol et si un quelconque sabotage au niveau du hard venait à se produire, l'équipe technique serait la seule suspecte. C'est la raison pour laquelle la procédure de maintenance doit être réalisée par plusieurs personnes (démultiplier les effectifs abaisse le pourcentage de chance de corrompre l'intégralité du système de maintenance et ainsi améliore l'intégrité de l'ensemble)

9.9.1.2. Protocole

On se rend bien compte que remplacer les actuelles liaisons filaires par des liaisons sans fils expose les systèmes de capteurs à un risque supplémentaire qui est le risque d'intrusion. En effet un réseau sans fil est interceptable alors qu'un réseau filaire l'est largement moins.

Les points à risque se trouvent tout au long de la liaison sans fil donc entre chaque nœud et à chaque point d'émission et de réception autrement dit tous les points où le signal peut être intercepté.

Assurer la sécurité c'est prévoir au maximum les risques d'attaque extérieure. Contrairement à la sûreté de fonctionnement ou la fiabilité, où l'on connaît les éléments contre lesquels on se protège, pour la sécurité l'attaquant est inconnu. On part donc du principe que l'attaquant connaît très bien le système qu'il va chercher les failles pour l'induire en erreur.

Il faut prendre en compte plusieurs paramètres :

- L'impact de l'attaque (en fonction de la criticité de l'attaque)
- Le coût de l'attaque (de quelques milliers à quelques millions pour du terrorisme)
- Le gain de l'attaquant (de l'impossibilité de décoller ou le non fonctionnement d'une application cabine afin d'attirer le mécontentement des passagers au crash de l'avion)

Plusieurs détracteurs peuvent être envisagés : des terroristes ou simplement des espions industriels

9.9.2. Ebauches de solutions pour parer à la sécurité

9.9.2.1. Aspect software :

Protection des protocoles (clefs wep wpa) crypto procédure redondance (Brouillage intrusion par fausse information intrusion par simple écoute)

Plusieurs types d'attaques sont possibles :

9.9.2.1.1. Le dénie de service : une attaque contre la disponibilité.

Ce problème est typique des protocoles Wireless. En effet il est tout à fait possible de saturer le réseau et ainsi brouiller tous les messages de la bande saturée.

Pour éviter ce type de problème, on peut par exemple choisir une bande de fréquence d'émission très étroite et la faire bouger assez rapidement de façon que les intrus ne puissent pas avoir le temps de la trouver et de la saturer. Cette méthode s'appelle le saut de fréquence et est utilisée par les militaires. Cependant, la technologie Bluetooth utilise aussi à moindre mesure le saut de fréquence.

On pourra aussi utiliser la télécommunication avec étalement de spectre : Le signal est transmis sur une bande passante considérablement plus large que l'ensemble des fréquences composant le signal original. Cette technique diminue le risque d'interférences avec d'autres signaux reçus tout en garantissant une certaine confidentialité. L'étalement de spectre utilise généralement une séquence ressemblant à du bruit pour étaler le signal de bande étroite en un signal de relative large-bande. Le récepteur récupère le signal original en corrélant le signal reçu avec une réplique de cette séquence.

A l'origine se trouvaient deux motivations : en premier, résister aux efforts ennemis pour brouiller le signal, puis pour cacher la communication elle-même. De nos jours l'aspect partage d'une même fréquence par plusieurs utilisateurs (accès multiple) est une de ses principales applications. Par ailleurs, l'étalement de spectre facilite les transmissions numériques dans les cas d'interférences par trajets multiples.

⇒ Solution n°1 : Le FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum), ou étalement de spectre par saut.

Définition : C'est une méthode de transmission de signaux qui utilise plusieurs canaux répartis sur une large bande de fréquences selon une séquence pseudo-aléatoire connue de l'émetteur et du récepteur.

Avantage : L'étalement de spectre offre trois avantages par rapport à l'utilisation d'une fréquence unique :

1. il rend le signal transmis très résistant aux interférences,
2. le signal est plus difficile à intercepter,
3. les signaux transmis de cette manière peuvent partager des bandes de fréquence avec d'autres types de transmission, ce qui permet d'utiliser plus efficacement la bande passante ; le partage des fréquences ajoute un minimum de bruit à l'un et à l'autre type de transmission.

Aujourd'hui les réseaux locaux sans fil utilisant cette technologie sont standards ce qui signifie que la séquence de fréquences utilisées est connue de tous (et n'assure donc plus la fonction de sécurisation des échanges) : le FHSS est utilisé dans le standard 802.11 (Wi-Fi) afin de réduire les interférences entre les transmissions des diverses stations d'une cellule.

Dans la norme 802.11, la bande de fréquence 2.4 - 2.4835 GHz permet de créer 79 canaux de 1 MHz chacun. La transmission se fait ainsi en émettant successivement sur un canal puis sur un autre pendant une courte période de temps (environ 400 ms) en utilisant une combinaison de canaux connu de toutes les stations, ce qui permet à un instant donné de transmettre un signal plus facilement reconnaissable sur une fréquence donnée

⇒ Solution n°2 : DSSS, ou Direct Sequence Spread Spectrum, (étalement de spectre à séquence directe),

Définition : est une technique d'étalement de spectre utilisée dans les communications par satellite, les réseaux sans fil et plus précisément le Wi-Fi.

Avantage :

Le but du DSSS est, d'une part, de rendre les signaux occupant une bande de fréquences réduite, comme un signal de parole, plus résistants aux brouillages rencontrés lors de la transmission; d'autre part de permettre à plusieurs liaisons de partager la même fréquence porteuse (Accès multiple par répartition par code). Pour cela, ils sont combinés avec un signal pseudo-aléatoire de fréquence beaucoup plus élevée. En conséquence, le signal résultant occupe une bande de fréquence plus large, déterminée par la fréquence du signal pseudo-aléatoire. Cette technique s'applique essentiellement à des liaisons numériques; le signal d'étalement est dans ce cas une séquence de code pseudo-aléatoire.

Le fait d'étaler la puissance du signal émis sur une large bande diminue la densité de puissance émise et dans le cadre d'applications militaires, le DSSS peut alors être utilisé dans un tout autre but : dissimuler le signal en augmentant sa ressemblance avec un bruit aléatoire.

En conclusion, le saut de fréquence, l'étalement par séquence directe, l'étalement par pseudo-bruit (en utilisant des séquences de pseudo-bruit), le chirp, et les combinaisons de ces techniques sont des formes d'étalement de spectre.

L'Ultra Wide Band est une technique de modulation qui accomplit le même effet en transmettant des impulsions de très courte durée. Le standard IEEE 802.11 utilise soit le FHSS ou DSSS pour son interface radio.

Elle est par exemple utilisée par les systèmes de positionnement par satellites (GPS, GLONASS), les liaisons cryptées militaires, les communications de la Navette Spatiale avec le sol, et plus récemment dans les liaisons sans fil Wi-Fi.

9.9.2.1.2. Intrusion, écoute :

Cette attaque n'est sur le moment par dérangeante si elle n'est pas couplée avec une autre. Cependant cette attaque est parable par de la cryptographie (message échangée par clef)

La cryptographie asymétrique, ou cryptographie à clé publique, est une méthode de chiffrement qui s'oppose à la cryptographie symétrique. Elle utilise une clé publique (qui est diffusée) qui permet de coder le message et une clé privée (gardée secrète) qui permet de décoder le message. Ainsi l'expéditeur peut coder le message que seul le destinataire pourra décoder.

Principe

La cryptographie asymétrique, ou cryptographie à clé publique est fondée sur l'existence de fonctions à sens unique — une fois la fonction appliquée à un message, il est extrêmement difficile de retrouver le message original.

En réalité, on utilise en cryptographie asymétrique des fonctions à sens unique et à brèche secrète. Une telle fonction est difficile à inverser, à moins de posséder une information particulière, tenue secrète, nommée clé privée.

À partir d'une telle fonction, voici comment se déroulent les choses : Alice souhaite pouvoir recevoir des messages chiffrés de n'importe qui. Elle génère alors une valeur à partir d'une fonction à sens unique et à brèche secrète à l'aide d'un algorithme de chiffrement asymétrique (liste ici), par exemple RSA.

Alice diffuse à tout le monde la fonction pour coder les messages (notée clé publique) mais garde secrète la fonction de décodage (notée clé privée)

Chiffrement

Un des rôles de la clé publique est de permettre le chiffrement ; c'est donc cette clé qu'utilisera Bob pour envoyer des messages chiffrés à Alice. L'autre clé — l'information secrète — sert à déchiffrer. Ainsi, Alice, et elle seule, peut prendre connaissance des messages de Bob, à condition que la brèche ne soit pas trouvée.

Authentification de l'origine

D'autre part, l'utilisation par Alice de sa clé privée sur le condensat d'un message, permettra à Bob de vérifier que le message provient bien d'Alice : il appliquera la clé publique d'Alice au condensat fourni (condensat chiffré avec la clé privée d'Alice) et retrouve donc le condensat original du message. Il lui suffira de comparer le condensat ainsi obtenu et le condensat réel du message pour savoir si Alice est bien l'expéditeur. C'est donc ainsi que Bob sera rassuré sur l'origine du message reçu : il appartient bien à Alice. C'est sur ce mécanisme notamment que fonctionne la signature numérique.

Analogies 1 : Le coffre-fort

Le chiffrement : Alice a choisi un coffre-fort. Elle l'envoie ouvert à Bob, et en garde la clé. Lorsque Bob veut écrire à Alice, il y dépose son message, ferme le coffre, et le renvoie à Alice. À sa réception, seule Alice peut ouvrir le coffre, puisqu'elle seule en possède la clé, à supposer le coffre inviolable, et que personne ne puisse retrouver la clé.

L'authentification ou la signature : Alice place un message dans le coffre-fort qu'elle ferme avant de l'envoyer à Bob. Si Bob parvient à l'aide de la clé publique d'Alice dont il dispose à ouvrir le coffre-fort c'est que c'est bien celui d'Alice et donc que c'est bien elle qui y a placé le message.

Analogies 2 : La boîte à deux serrures

Une autre analogie envisageable serait d'imaginer une boîte avec deux serrures différentes. Lorsque l'on ferme la boîte d'un côté, seule la clé correspondant à l'autre serrure permet l'ouverture de la boîte et vice-versa. Une des clés est privée et conservée secrète, l'autre est dite publique et un exemplaire peut-être obtenu par quiconque souhaite utiliser la boîte.

Pour chiffrer un message Bob prend la boîte, y place son message, et la ferme à l'aide de la clé publique. Seul le détenteur de la clé privée permettant d'accéder à l'autre serrure, Alice en l'occurrence, sera en mesure de rouvrir la boîte.

Pour signer un message, Alice le place dans la boîte et ferme celle-ci à l'aide de sa clé privée. Ainsi n'importe qui ayant récupéré la clé publique pourra ouvrir la boîte. Mais comme la boîte a été fermée par la clé privée, cette personne sera assurée que c'est bien Alice, seule détentrice de cette clé, qui aura placé le message dans la boîte et fermé ladite boîte.

Applications

Transmission sécurisée de la clé symétrique

La cryptographie asymétrique répond à un besoin majeur de la cryptographie symétrique : le partage sécurisé d'une clé entre deux correspondants, afin de prévenir l'interception de cette clé par une personne tierce non autorisée, et donc la lecture des données chiffrées sans autorisation.

Les mécanismes de chiffrement symétrique étant moins coûteux en temps de calcul, ceux-ci sont préférés aux mécanismes de chiffrement asymétrique. Cependant toute utilisation de clé de chiffrement symétrique nécessite que les deux correspondants se partagent cette clé, c'est-à-dire la connaissent avant l'échange. Ceci peut être un problème si la communication de cette clé s'effectue par l'intermédiaire d'un medium non sécurisé, « en clair ». Afin de pallier cet inconvénient, on utilise un mécanisme de chiffrement asymétrique pour la seule phase d'échange de la clé symétrique, et l'on utilise cette dernière pour tout le reste de l'échange.

Mécanismes d'authentification

Un inconvénient majeur de l'utilisation des mécanismes de chiffrement asymétriques est le fait que la clé publique est distribuée à toutes les personnes : Bob, Carole, ... souhaitant échanger des données de façon confidentielle. De ce fait, lorsque la personne possédant la clé privée, Alice, déchiffre les données chiffrées, elle n'a aucun moyen de vérifier avec certitude la provenance de ces données (Bob, ou Carole ...) : on parle de problèmes d'authentification. Afin de résoudre ce problème, on utilise des mécanismes d'authentification permettant de

garantir la provenance des informations chiffrées. Ces mécanismes sont eux aussi fondés sur le chiffrement asymétrique.

Principe d'authentification par chiffrement asymétrique :

Objectif : Bob souhaite envoyer des données chiffrées à Alice en lui garantissant qu'il en est l'expéditeur.

1. Bob crée une paire de clés asymétriques : il conserve la clé privée et envoie la clé publique à Alice
2. Alice crée une paire de clés asymétriques : clé privée (qu'elle conserve), clé publique (qu'elle diffuse librement, notamment à Bob)
3. Bob effectue un condensat de son message « en clair » puis chiffre ce condensat avec sa propre clé privée
4. Bob chiffre son message avec la clé publique d'Alice.
5. Bob envoie le message chiffré accompagné du condensat chiffré.
6. Alice reçoit le message chiffré de Bob, accompagné du condensat.
7. Alice déchiffre le message avec sa propre clé privée. À ce stade le message est lisible mais elle ne peut pas être sûre que Bob en est l'expéditeur.
8. Alice déchiffre le condensat avec la clé publique de Bob.
9. Alice utilise la même fonction de hachage sur le texte en clair et compare avec le condensat déchiffré de Bob. Si les deux condensats correspondent, alors Alice peut avoir la certitude que Bob est l'expéditeur. Dans le cas contraire, on peut présumer qu'une personne malveillante a tenté d'envoyer un message à Alice en se faisant passer pour Bob !

Cette méthode d'authentification utilise la spécificité des paires de clés asymétriques : si l'on chiffre un message en utilisant la clé publique, alors on peut déchiffrer le message en utilisant la clé privée ; l'inverse est aussi possible : si l'on chiffre en utilisant la clé privée alors on peut déchiffrer en utilisant la clé publique.

Certificats

La cryptographie asymétrique est également utilisée avec les certificats numériques, celui-ci contenant la clé publique de l'entité associée au certificat. La clé privée est quant à elle stockée au niveau de cette dernière entité. Une application des certificats est par exemple la mise en œuvre d'une infrastructure à clés publiques (PKI) pour gérer l'authentification et la signature numérique d'une entité, par exemple un serveur web (Apache avec le module SSL par exemple), ou simplement un client souhaitant signer et chiffrer des informations à l'aide de son certificat de la façon décrite dans les sections précédentes.

Une clé privée inviolable ?

Un chiffrement symétrique au moyen d'une clé de 128 bit propose 2128 (un nombre à trente-huit chiffres) façons de chiffrer un message. Un pirate qui essaierait de déchiffrer le message par la force brute devrait les essayer une par une.

Pour les systèmes à clé publique, il en va autrement. Tout d'abord les clés sont plus longues (par exemple 1 024 bit minimum pour RSA) ; ceci est dû au fait qu'elles possèdent une structure mathématique très particulière (on ne peut pas choisir une suite de bits aléatoire comme clé secrète, car, dans le cas du RSA, seuls les nombres premiers sont utilisés). Ensuite, il y a clairement mieux à faire qu'une recherche exhaustive sur, par exemple, 1 024 bit, à savoir exploiter la structure mathématique de la clé (pour RSA, cela mène à la factorisation).

Il faut noter le développement actuel de la cryptographie utilisant les courbes elliptiques, qui permettent (au prix d'une théorie et d'implémentations plus complexes) l'utilisation de clés nettement plus petites que celles des algorithmes classiques (une taille de 160 bit étant considérée comme très sûre actuellement), pour un niveau de sécurité équivalent.

Rf fingerprint :

Le processus d'identification d'émetteurs radio qui consiste à examiner leurs caractéristiques uniques en début de transmission est appelé la prise des empreintes digitales Rf. La sécurité de réseaux sans fil peut être améliorée en poussant l'utilisateur à prouver son identité. Si l'empreinte digitale d'un dispositif de réseau est non identifiée il pourra être considéré comme une menace. Pour SAHARA il faudra que chaque nœud du réseau puisse être identifié au moyen de son empreinte digitale Rf. Un système d'identification complet sera à envisager, y compris l'acquisition de données, la détection passagère et l'extraction d'empreinte digitale de Rf. Des études ont démontré que la technique des empreintes digitales Rf peut être utilisée comme un outil supplémentaire pour améliorer la sécurité de réseaux sans fil.

Dans la cryptographie à clef publique, une empreinte digitale de clef publique est une courte séquence d'octets utilisés afin d'authentifier une clé publique plus longue. Les empreintes digitales sont créées en appliquant une fonction de hachage cryptographique à une clé publique. Puisque les empreintes digitales sont plus courtes que les clés auxquelles elles se réfèrent, elles peuvent être utilisées pour simplifier certaines tâches de gestion de clefs.

Une technique en cours d'évaluation a été conçue et mise en œuvre pour identifier la carte d'interface de réseau source (en anglais NIC network interface card) d'un IEEE 802.11 cadré par l'analyse de fréquence radio passive. Cette technique, appelée PARADIS, démultiplie les imperfections infimes de matériel émetteur qui sont acquises à la fabrication et sont présentes même dans les NICS autrement identiques. Ces imperfections sont spécifiques à chaque émetteur et se manifestent comme les artefacts des signaux émis. PARADIS, mesure les artefacts se différenciant du sans fil individuels dans le domaine de modulation, et applique des outils de classification machine-learning appropriés pour atteindre un degré d'exactitude d'identification NIC significativement plus hauts que les techniques antérieures les mieux connus. L'efficacité de PARADIS a été démontrée expérimentalement la différenciation entre

plus de 130 NICS 802.11 identiques avec une exactitude de plus de 99 %. Les résultats montrent aussi que l'exactitude de PARADIS est résistante contre au bruit ambiant et aux fluctuations du canal sans fil.

9.9.2.1.3. Intrusion et diffusion de fausses informations :

Le meilleur moyen pour remédier à ce problème reste la redondance du signal mais la cryptographie asymétrique (chiffrement) y contribue aussi fortement surtout si les procédures de génération des clefs sont correctement suivies (personne n'y a accès et les clefs sont régulièrement changées comme cela est prévu pour les systèmes critiques)

9.9.2.2. Aspect hard ware :

En ce qui concerne l'aspect hard ware le détracteur ne peut agir à distance il faut qu'il ait un contact direct avec le matériel et comme pour tous systèmes électroniques accessibles, la méthode de protection principale reste la procédure de maintenance. Augmenter le nombre de vérification (et de vérificateur) permet de protéger le système.

Des capteurs peuvent aussi alarmer l'unité de contrôle en cas de panne du système et dans des cas extrême ou le matériel ne doit absolument pas se retrouver entre les mains d'un détracteur, poser un système d'autodestruction si le système est retiré de sa position initiale